



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ: ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

# Προσομοίωση Διαχείρισης Μηχανημάτων Αυτόματων Συναλλαγών

---

Μεταπτυχιακή Εργασία

Υπό

Γρηγοριάδου Ελένης & Σιώζιου Βασιλικής

Επιβλέπων: Δρ. Παντελής Δημήτριος



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του  
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

Βόλος, Οκτώβριος 2016

Copyright© 2016 Γρηγοριάδου Ελένη & Σιώζιου Βασιλική

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. Allrightsreserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Θεσσαλίας.

## Εξεταστική Επιτροπή

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Δημήτριος Παντελής  
Αναπληρωτής Καθηγητής,  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Γεώργιος Λυμπερόπουλος  
Καθηγητής,  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Γεώργιος Κοζανίδης  
Επίκουρος Καθηγητής,  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας στον κ. Δημήτριο Παντελή, αναπληρωτή καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας με αντικείμενο Στοχαστικά Πρότυπα Επιχειρησιακής Έρευνας στη Βιομηχανική Διοίκηση, για την ευκαιρία που μας παρείχε να ασχοληθούμε με το συγκεκριμένο θέμα και για την καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της μεταπτυχιακής εργασίας.

Επιπλέον, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τον κ. Γεώργιο Λυμπερόπουλο και τον κ. Γεώργιο Κοζανίδη, τόσο για τις εύστοχες υποδείξεις τους όσο και για τις σημαντικές παρατηρήσεις τους.

Τέλος θα θέλαμε να εκφράσουμε την ευγνωμοσύνη μας στις οικογένειές μας για την απλόχερη υλική και ηθική υποστήριξη σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μας.

## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η μελέτη μέσω προσομοίωσης της διαχείρισης μηχανημάτων αυτόματων συναλλαγών. Θεωρούμε ένα καθορισμένο χρόνο ανεφοδιασμού καθώς επίσης και μια συγκεκριμένη χωρητικότητα χαρτονομισμάτων και νομισμάτων για τα μηχανήματα. Θα εξετάσουμε διάφορα σενάρια αναπλήρωσης χρημάτων στα μηχανήματα αυτόματων συναλλαγών φτιάχνοντας ένα μοντέλο προσομοίωσης. Για τη δημιουργία του μοντέλου, όσον αφορά τους χρόνους μεταξύ αφίξεων και παραμονής και το ποσόν που δίνει ο πελάτης, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το χώρο στάθμευσης της εταιρίας Cityzen που βρίσκεται στα Δικαστήρια Ευελπίδων. Για κάθε σενάριο υπολογίζονται η πιθανότητα να εξαντληθούν τα χρήματα από το μηχανήμα, ο πραγματικός χρόνος ανεφοδιασμού καθώς και τα χρήματα που απομένουν στο μηχανήμα στις περιπτώσεις που δεν εξαντλούνται πριν την αναπλήρωση. Τα αποτελέσματα από ένα τέτοιο μοντέλο προσομοίωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το χρήστη για να επιλέξει τη χωρητικότητα του μηχανήματος καθώς και κάθε πότε θα ανεφοδιάζεται με στόχο την αύξηση των προσδοκώμενων κερδών του.

## Περιεχόμενα

Εξεταστική Επιτροπή .....	iii
Ευχαριστίες.....	iv
Περίληψη.....	v
Κατάλογος εικόνων .....	viii
Κατάλογος πινάκων.....	x
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή .....	1
1.1 Κίνητρο και Υπόβαθρο.....	1
1.2 Μηχανήματα αυτόματων συναλλαγών .....	1
1.2.1 Χώροι στάθμευσης .....	3
1.3 Προσομοίωση .....	4
1.4 Δομή Διπλωματικής εργασίας.....	5
Κεφάλαιο 2 Ορισμός του προβλήματος.....	6
2.1 Περιγραφή του προβλήματος .....	6
2.2 Επεξεργασία Δεδομένων .....	6
2.3 Μοντέλο συναλλαγών .....	23
Κεφάλαιο 3 .....	25
3.1 Επεξήγηση Αλγορίθμου .....	25
3.2 Ανάλυση αλγορίθμου .....	26
3.3 Διάγραμμα ροής .....	27
Κεφάλαιο 4 Αποτελέσματα .....	32
Κεφάλαιο 5 Σύνοψη .....	39
Βιβλιογραφία.....	40
Παράρτημα.....	41
1 Αλγόριθμος προγραμματισμού γεγονότων .....	41
2 Στατιστικοί έλεγχοι .....	42
2.1 Kolmogorov-Smirnov .....	43
2.2 Chi-Squared .....	44
2.3 Σύγκριση μέσων τιμών .....	44
3 Υπολογιστικά πακέτα που χρησιμοποιήθηκαν .....	45
3.1 Matlab.....	45

3.2 S.P.S.S.....	46
3.3 Arena.....	46
4 Κώδικας Προσομοίωσης.....	48

## Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Μηχανήματα αυτόματων συναλλαγών.....	2
Εικόνα 2: Περιλαμβάνει τερματικά εισόδου και εξόδου, μπάρες, κάμερες αναγνώρισης της πινακίδας του οχήματος, χειροκίνητο και αυτόματα ταμεία (μηχανήματα πληρωμής) και αναγνώστες καρτών .....	4
Εικόνα 3: Μορφή δεδομένων.....	8
Εικόνα 4: Ιστόγραμμα για το i χρονικό διάστημα του 1 <sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους εξυπηρέτησης.....	10
Εικόνα 5: Ιστόγραμμα για το ii χρονικό διάστημα του 1 <sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους εξυπηρέτησης.....	10
Εικόνα 6: Ιστόγραμμα για το iii χρονικό διάστημα του 1 <sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους εξυπηρέτησης.....	11
Εικόνα 7: Ιστόγραμμα για το iv χρονικό διάστημα του 1ου εξαμήνου για τους χρόνους εξυπηρέτησης.....	11
Εικόνα 8: Ιστόγραμμα για το i χρονικό διάστημα του 2 <sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους εξυπηρέτησης.....	12
Εικόνα 9: Ιστόγραμμα για το ii χρονικό διάστημα του 2 <sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους εξυπηρέτησης.....	12
Εικόνα 10: Ιστόγραμμα για το iii χρονικό διάστημα του 2 <sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους εξυπηρέτησης.....	13
Εικόνα 11: Ιστόγραμμα για το iv χρονικό διάστημα του 2 <sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους εξυπηρέτησης.....	13
Εικόνα 12: Ιστόγραμμα για το i χρονικό διάστημα ολόκληρου του έτους για τους χρόνους εξυπηρέτησης.....	14
Εικόνα 13: Ιστόγραμμα για το ii χρονικό διάστημα ολόκληρου του έτους για τους χρόνους εξυπηρέτησης.....	14
Εικόνα 14: Ιστόγραμμα για το iii χρονικό διάστημα ολόκληρου του έτους για τους χρόνους εξυπηρέτησης.....	15
Εικόνα 15: Ιστόγραμμα για το iv χρονικό διάστημα ολόκληρου του έτους για τους χρόνους εξυπηρέτησης.....	15
Εικόνα 16: Ιστόγραμμα για το i χρονικό διάστημα του 1 <sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους μεταξύ αφίξεων .....	16
Εικόνα 17: Ιστόγραμμα για το ii χρονικό διάστημα του 1 <sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους μεταξύ αφίξεων .....	16
Εικόνα 18: Ιστόγραμμα για το iii χρονικό διάστημα του 1 <sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους μεταξύ αφίξεων .....	17
Εικόνα 19: Ιστόγραμμα για το iv χρονικό διάστημα του 1 <sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους μεταξύ αφίξεων .....	17
Εικόνα 20: Ιστόγραμμα για το i χρονικό διάστημα του 2 <sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους μεταξύ αφίξεων .....	18



Εικόνα 21: Ιστογράμμο για το ii χρονικό διάστημα του 2 <sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους μεταξύ αφίξεων .....	18
Εικόνα 22: Ιστογράμμο για το iii χρονικό διάστημα του 2 <sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους μεταξύ αφίξεων .....	19
Εικόνα 23: Ιστογράμμο για το iv χρονικό διάστημα του 2 <sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους μεταξύ αφίξεων .....	19
Εικόνα 24: Ιστογράμμο για το i χρονικό διάστημα ολόκληρου του έτους για τους χρόνους μεταξύ αφίξεων .....	20
Εικόνα 25: Ιστογράμμο για το ii χρονικό διάστημα ολόκληρου του έτους για τους χρόνους μεταξύ αφίξεων .....	20
Εικόνα 26: Ιστογράμμο για το iii χρονικό διάστημα ολόκληρου του έτους για τους χρόνους μεταξύ αφίξεων .....	21
Εικόνα 27: Ιστογράμμο για το iv χρονικό διάστημα ολόκληρου του έτους για τους χρόνους μεταξύ αφίξεων .....	21
Εικόνα 29: Διάγραμμα ροής για τον κώδικα προσομοίωσης .....	28
Εικόνα 30: Διάγραμμα ροής για την συνάρτηση χρεώσεων, όπου ζείναι ο χρόνος παραμονής του κάθε πελάτη στο σύστημα .....	29
Εικόνα 31: Διάγραμμα ροής της συνάρτησης των εισαχθέντων χρημάτων .....	30
Εικόνα 32: Διάγραμμα ροής της συνάρτησης που υπολογίζει τα ρέστα .....	31

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Χρονικά Διαστήματα .....	8
Πίνακας 2: Παράμετροι εκθετικής κατανομής για χρόνους μεταξύ αφίξεων .....	22
Πίνακας 3: Παράμετροι κατανομής Weibull για χρόνους παραμονής .....	22
Πίνακας 4:Τιμοκατάλογος της εταιρίας Cityzen.....	23
Πίνακας 5:Πιθανότητα να πληρώσει ο πελάτης με μια από τις παραπάνω χρηματικές αξίες ανάλογα με τη χρέωση .....	24
Πίνακας 6: Ποσότητες ανεφοδιασμού για κέρματα και χαρτονομίσματα .....	32
Πίνακας 7: Σύγκριση μέσων τιμών .....	34
Πίνακας 8: Στοχαστικοί χρόνοι άφιξης και παραμονής .....	35
Πίνακας 9: Στοχαστικοί χρόνοι άφιξης και παραμονής .....	36
Πίνακας 10: Ντετερμινιστικοί χρόνοι άφιξης και παραμονής .....	37
Πίνακας 11:Ντετερμινιστικοί χρόνοι άφιξης και παραμονής .....	38

# Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

## 1.1 Κίνητρο και Υπόβαθρο

Στη συγκεκριμένη μεταπτυχιακή εργασία ασχολούμαστε με τη διαχείριση μηχανημάτων αυτόματων συναλλαγών και συγκεκριμένα με τον προγραμματισμό του ανεφοδιασμού τους. Το πρόβλημα αυτό παρουσιάζει ενδιαφέρον διότι μπορεί να έχει σοβαρές οικονομικές επιπτώσεις. Αν το εκάστοτε μηχάνημα ανεφοδιάζεται αρκετά συχνά, η διαδικασία αυτή έχει μεγάλο κόστος. Αντίθετα αν ο ανεφοδιασμός γίνεται χρονικά πιο αραιά θα πρέπει να δεσμεύεται αρκετά μεγάλο κεφάλαιο.

Το συγκεκριμένο είναι πρόβλημα στοχαστικής βελτιστοποίησης, που αποτελεί τομέα της Επιχειρησιακής Έρευνας, και μελετήθηκε μέσω προσομοίωσης διαφόρων σεναρίων ανεφοδιασμού των μηχανημάτων ενός χώρου στάθμευσης. Για την υλοποίηση της προσομοίωσης αυτής δεν χρησιμοποιήθηκε κάποιο έτοιμο λογισμικό πακέτο αλλά γράφτηκε κώδικας εξ αρχής, πράγμα που αποτέλεσε ένα επιπλέον κίνητρο για την ανάληψη της εργασίας αυτής.

## 1.2 Μηχανήματα αυτόματων συναλλαγών

Στη σύγχρονη εποχή, το Internet έχει γίνει αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής μας. Η συνεχής και με γεωμετρική πρόοδο εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και της τεχνολογίας έχει οδηγήσει, ανάμεσα σε άλλα, τις επιχειρήσεις να αναζητούν την αναβάθμιση και τον εκσυγχρονισμό της υποδομής και των υπηρεσιών τους προκειμένου να μπορούν να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις της εποχής τους και να ξεχωρίσουν από τους ανταγωνιστές τους.

Τα μηχανήματα αυτόματων συναλλαγών δεν αποτελούν εξαίρεση, καθώς καθημερινά βλέπουμε ολοένα και πιο εξελιγμένα μηχανήματα να εμφανίζονται. Αυτό συνεπάγεται ότι ολοένα και περισσότερες υπηρεσίες είναι σε θέση να παρέχουν υπηρεσίες χρηματικών συναλλαγών μέσω των εν λόγω μηχανημάτων. Έτσι είναι αξιοσημείωτο γεγονός ότι κάθε επιχείρηση θέλει να είναι ανταγωνιστική παρέχοντας υπηρεσίες μέσω αυτού στους υποψηφίους πελάτες της. Τα πλεονεκτήματα ενός μηχανήματος αυτόματων συναλλαγών διακρίνονται σε δύο βασικούς τομείς: πρώτον πλεονεκτήματα που αφορούν την επιχείρηση και δεύτερον τους πελάτες.



Εικόνα 1: Μηχανήματα αυτόματων συναλλαγών

Αρχικά, μια επιχείρηση στα πλαίσια του ανταγωνισμού με άλλες επιχειρήσεις προκειμένου να επιβιώσει αναζητά νέες καινοτόμες ιδέες που θα εξασφαλίσουν την μακροχρόνια λειτουργία της. Μια καινοτόμος ιδέα είναι η εγκατάσταση μηχανημάτων αυτόματων συναλλαγών, τα οποία θα αποφέρουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα.

- Αύξηση του τζίρου και των κερδών της εταιρίας
- Αύξηση επιπέδου παρεχόμενων υπηρεσιών προς τους πελάτες
- Επέκταση ωραρίου όλο το 24ωρο
- Άμεση και βέβαιη πηγή εσόδων
- Μικρό απαιτούμενο κεφάλαιο
- Γρήγορη απόσβεση αρχικής επένδυσης
- Απουσία κόστους υπαλλήλων
- Μηδενικά λειτουργικά έξοδα
- Εύκολη παρακολούθηση και απομακρυσμένη διαχείριση μέσω εφαρμογών Internet
- Μεγάλη απόδοση επένδυσης έναντι του αρχικού κόστους
- Καινοτομία επιχείρησης
- Πρόκληση γενικού ενδιαφέροντος για την επιχείρηση

Στη συνέχεια, η ύπαρξη μηχανημάτων αυτόματων συναλλαγών θα καταστεί αναγκαία και για τους πελάτες, εφόσον είναι το άμεσο κοινό που απευθύνεται μια επιχείρηση εξασφαλίζοντας τους:

- 24ωρη εξυπηρέτηση χωρίς χρονικούς περιορισμούς ωραρίων
- Άμεση και ταχύτατη ικανοποίηση των αναγκών των πελατών
- Αποφυγή σπατάλης χρόνου

- Απλός και φιλικός τρόπος χειρισμού μηχανήματος

### 1.2.1 Χώροι στάθμευσης

Σε όλες σχεδόν τις μεγάλες πόλεις, ο χρόνος και η απογοήτευση που συνδέονται με την εύρεση χώρου στάθμευσης κατά τις ώρες αιχμής όχι μόνο αναστατώνει τους οδηγούς, αλλά μειώνει σημαντικά την οικονομική, περιβαλλοντική και κοινωνική βιωσιμότητα της πόλης. Η οικονομική επίπτωση, που μετράται σε όρους σπατάλης πόρων (χρόνος, καύσιμα) είναι η πιο ορατή. Επιπλέον, σύμφωνα με έρευνα το έτος 2011, το 60% των ερωτηθέντων οδηγών ανέφεραν ότι τουλάχιστον μία φορά ήταν τόσο απογοητευμένοι ψάχνοντας για χώρο στάθμευσης που τελικά εγκατέλειψαν, αφήνοντας πίσω τελικά μόνο συμφόρηση και οικονομική χασούρα.

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι επίσης σημαντικές καθώς σε μια μεγάλη πόλη όπως η Αθήνα, η περίσσεια απόσταση του οχήματος λόγω μη εύρεσης θέσης πάρκινγκ συνεπάγεται και περισσότερη μόλυνση εξαιτίας της αυξανόμενης εκπομπής τόνων CO<sub>2</sub> ετησίως. Κατά συνέπεια κρίνεται αναγκαία η ύπαρξη χώρων στάθμευσης για την καλύτερη δυνατή εξυπηρέτηση των πολιτών.

Ο τρόπος λειτουργίας των χώρων στάθμευσης είναι ο εξής. Καθώς ο οδηγός καταφθάνει στον εκάστοτε χώρο στάθμευσης, πατώντας ένα κουμπί στο σημείο εισόδου, παίρνει το εισιτήριό του, η μπάρα ανοίγει και σταθμεύει. Σημειώνεται ότι υπάρχει κάμερα που αναγνωρίζει τον αριθμό κυκλοφορίας του οχήματος. Όταν επανέλθει, πηγαίνει με το εισιτήριο σε ένα από τα αυτόματα μηχανήματα πληρωμής, το μηχάνημα «διαβάζει» το εισιτήριο και τον πληροφορεί πόσα πρέπει να πληρώσει. Ο χρήστης βάζει τα χρήματα στο μηχάνημα (κέρματα ή χαρτονομίσματα μέχρι 50 ευρώ), παίρνει την απόδειξη και τα ρέστα, ενώ κρατάει και το εισιτήριο. Με το αυτοκίνητό του φθάνει στην έξοδο και εισάγει στη σχισμή ενός μηχανήματος το εισιτήριο. Το μηχάνημα κρατάει το εισιτήριο, η μπάρα ανοίγει και ο οδηγός φεύγει.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι για την αποφυγή συμφόρησης, ο χρήστης πρέπει να πάει στο αυτόματο μηχάνημα πληρωμής και να πληρώσει και μετά να επιβιβασθεί στο όχημά του για να φύγει. Τονίζεται πως εάν η είσοδος και η έξοδος του οχήματος από το πάρκινγκ γίνουν εντός 15 λεπτών, δεν καταβάλλεται αντίτιμο.



Εικόνα 2: Περιλαμβάνει τερματικά εισόδου και εξόδου, μπάρες, κάμερες αναγνώρισης της πινακίδας του οχήματος, χειροκίνητο και αυτόματα ταμεία (μηχανήματα πληρωμής) και αναγνώστες καρτών

### 1.3 Προσομοίωση

Στην εργασία αυτή αναπτύχθηκε κώδικας για την προσομοίωση στο υπολογιστικό πακέτο Matlab. Γενικά η προσομοίωση, ως διαδικασία, έχει εξελιχθεί αρκετά στο πέρασμα των χρόνων από την έναρξή της στη δεκαετία του '60. Οι πρόωρες προσομοιώσεις αναπτύχθηκαν εξ ολοκλήρου μέσα σε κώδικα γλωσσών προγραμματισμού και δεν παρείχαν καμία οπτική επίδειξη του προσομοιωμένου συστήματος. Η πιο πρόσφατη έκδοση του λογισμικού προσομοίωσης χρησιμοποιεί τυποποιημένα αντικείμενα και τη λειτουργία drag-and-drop, που καθιστούν την δημιουργία προτύπων προσομοίωσης εύκολη, χωρίς την ανάγκη για βοήθεια από έμπειρο προγραμματιστή. Κατά συνέπεια, η προσομοίωση γίνεται αρκετά γρήγορα.

Υπό την ευρύτερη έννοιά της, η προσομοίωση χρησιμοποιεί έναν υπολογιστή για να μιμηθεί μια πραγματική φυσική διαδικασία. Κατά την προσομοίωση λαμβάνεται μια ροή γεγονότων που συμβαίνουν σε μια πεπερασμένη χρονική διάρκεια στον πραγματικό κόσμο και τοποθετείται ως δεδομένο εισόδου στο πρόγραμμα προσομοίωσης του υπολογιστή. Παραδείγματα τέτοιων γεγονότων είναι η καθημερινή λειτουργία μιας τράπεζας, η γραμμή παραγωγής ενός εργοστασίου, η ανάθεση προσωπικού ενός νοσοκομείου ή ενός τηλεφωνικού κέντρου.

Γενικότερα, όλα τα παραπάνω πηγάζουν από την ανάγκη μελέτης ενός συστήματος για την κατανόηση των σχέσεων μεταξύ των συστατικών του ή για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του συστήματος κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Σε κάποιες από αυτές, το σύστημα επιτρέπει την άμεση μελέτη του, κάτι που δεν είναι

όμως πάντα εφικτό μιας και ο πειραματισμός με ένα σύστημα μπορεί να είναι αδύνατος ή καθόλου πρακτικός.

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης της προσομοίωσης στη μελέτη συστημάτων είναι πολλά και έχουν γίνει εμφανέστερα τα τελευταία χρόνια με την ανάπτυξη που έχει επιτευχθεί στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές που έχουν γίνει το κυρίαρχο εργαλείο στη μέθοδο αυτή. Κυρίαρχο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η οικονομία χρόνου που επιτυγχάνεται. Ένα πείραμα που διεξάγεται στον υπολογιστή δεν είναι απαραίτητο να λειτουργήσει σε πραγματικό χρόνο, αλλά μπορεί να γίνει προσομοίωση αυτού. Προσομοίωση που μπορεί να γίνει όλο και πιο σύντομη όσο γρηγορότερη σε επίπεδα υλικού και λογισμικού γίνεται η υπολογιστική δύναμη.

## 1.4 Δομή Διπλωματικής εργασίας

Η δομή της μεταπτυχιακής εργασίας έχει ως εξής: Στο Κεφάλαιο 2 παρατίθεται ο ορισμός του προβλήματος. Παρουσιάζεται αναλυτικά η επεξεργασία των δεδομένων καθώς και το μοντέλο συναλλαγών της ισχύουσας πολιτικής της εταιρίας που διαχειρίζεται το χώρο στάθμευσης. Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η ανάλυση του αλγορίθμου προσομοίωσης με τον κυρίως κώδικα και τις συναρτήσεις που το απαρτίζουν. Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν και στο Κεφάλαιο 5 δίνονται τα τελικά συμπεράσματα. Τέλος, στο Παράρτημα παρουσιάζεται το γνωστικό υπόβαθρο της παρούσας εργασίας καθώς και ο κώδικας προσομοίωσης.

## Κεφάλαιο 2 Ορισμός του προβλήματος

### 2.1 Περιγραφή του προβλήματος

Στόχο της παρούσας εργασίας αποτελεί η μελέτη μέσω προσομοίωσης της διαχείρισης μηχανημάτων αυτόματων συναλλαγών. Θεωρούμε ένα καθορισμένο χρόνο ανεφοδιασμού καθώς επίσης και μια συγκεκριμένη χωρητικότητα χαρτονομισμάτων και νομισμάτων για τα μηχανήματα. Θα εξετάσουμε διάφορα σενάρια αναπλήρωσης χρημάτων στα μηχανήματα αυτόματων συναλλαγών φτιάχνοντας ένα μοντέλο προσομοίωσης. Για τη δημιουργία του μοντέλου, όσον αφορά τους χρόνους μεταξύ αφίξεων και παραμονής και το ποσόν που δίνει ο πελάτης, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το χώρο στάθμευσης της εταιρίας Cityzen που βρίσκεται στα Δικαστήρια Ευελπίδων. Η Cityzen προσφέρει όχι απλώς τις καλύτερες υπηρεσίες στάθμευσης στην Ελλάδα, αλλά και μια ολιστική εμπειρία κάλυψης αναγκών όπως υπηρεσίες πλυντηρίου και Βιολογικού Καθαρισμού οχημάτων, ανακύκλωση λαμπτήρων και μικρών συσκευών, φόρτιση ηλεκτρικών αυτοκινήτων κ.ά.. Για κάθε σενάριο υπολογίζονται η πιθανότητα να εξαντληθούν τα χρήματα από το μηχάνημα, ο πραγματικός χρόνος ανεφοδιασμού καθώς και τα χρήματα που απομένουν στο μηχάνημα στις περιπτώσεις που δεν εξαντλούνται πριν την αναπλήρωση. Τα αποτελέσματα από ένα τέτοιο μοντέλο προσομοίωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το χρήστη για να επιλέξει τη χωρητικότητα του μηχανήματος καθώς και κάθε πότε θα ανεφοδιάζεται με στόχο την αύξηση των προσδοκώμενων κερδών του.

### 2.2 Επεξεργασία Δεδομένων

Τα δεδομένα που μας δόθηκαν από την εταιρία είναι από ένα έτος, το 2013 και αφορούν 60000 πελάτες περίπου. Παρατηρούμε ότι οι πελάτες στον εν λόγω χώρο στάθμευσης χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: μηνιαίοι, ωριαίοι καθώς επίσης δικηγόροι και φοιτητές οι οποίοι έχουν ειδικές χρεώσεις. Λόγω αυτού ασχοληθήκαμε αποκλειστικά με τους ωριαίους πελάτες διότι ανήκουν στην κατηγορία που εμφανίζει ιδιαίτερη τυχαιότητα αφού οι χρεώσεις εξαρτώνται απόλυτα από τον χρόνο παραμονής τους στο σύστημα. Έτσι απομονώσαμε τα δεδομένα για τους ωριαίους πελάτες τα οποία είναι περίπου 40000 για το εν λόγω έτος. Επειδή όμως η επεξεργασία ενός τόσο μεγάλου εύρους δεδομένων δεν είναι εφικτή, χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική τεχνικές εξόρυξης



δεδομένων (data mining techniques) για τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Έτσι, αποφασίσαμε να επικεντρωθούμε σε ένα τμήμα από αυτά και πιο συγκεκριμένα τρεις μέρες για κάθε μήνα του έτους.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα δεδομένα που λάβαμε περιείχαν τις παρακάτω πληροφορίες για τον κάθε αφιχθέντα πελάτη:

- Κωδικός αριθμός εισιτηρίου εισόδου στο χώρο στάθμευσης
- Πινακίδες οχήματος
- Τύπος πελάτη (μηνιαίοι, ωριαίοι, ειδικής χρέωσης)
- Χρόνος εισόδου (ημερομηνία και ώρα)
- Χρόνος εξόδου (ημερομηνία και ώρα)
- Χρόνος πληρωμής(ημερομηνία και ώρα)
- Κωδικός μηχανήματος πληρωμής
- Τρόπος πληρωμής
- Χρέωση
- Ποσό πληρωμής
- Ρέστα

Από τα παραπάνω δεδομένα χρησιμοποιήσαμε αυτά που αφορούν αποκλειστικά τους ωριαίους πελάτες και είναι οι χρόνοι άφιξης-αναχώρησης του κάθε πελάτη, η χρέωση και το ποσό των χρημάτων που πλήρωσε. Αφού λοιπόν επεξεργαστήκαμε τα δεδομένα αυτά, προέκυψαν οι χρόνοι μεταξύ αφίξεων των πελατών και οι χρόνοι παραμονής τους. Ενδεικτικά, παραθέτουμε ένα απόσπασμα των δεδομένων στον παρακάτω πίνακα.

ENTRY TIME	EXIT TIME	PAYMENT TIME	PAYMENT AT	Payment type	FEE	MONEY INSERTED	CHANGE
01/01/2013 15:38:03	01/01/2013 15:40:18						
02/01/2013 09:58:37	02/01/2013 12:24:39	2013-01-02 12:22:26	33	Μετρητά	12,50	20,00	7,50
02/01/2013 10:26:23	02/01/2013 10:47:25	2013-01-02 10:45:58	37	Μετρητά	10,00	10,00	
02/01/2013 11:13:03	02/01/2013 11:45:13	2013-01-02 11:43:28	37	Μετρητά	10,00	20,00	10,00
02/01/2013 12:52:27	02/01/2013 12:55:08						
03/01/2013 08:10:08	03/01/2013 09:23:02	2013-01-03 09:20:58	37	Μετρητά	11,50	20,00	8,50
03/01/2013 08:12:28	03/01/2013 10:44:57	2013-01-03 10:39:56	3	Μετρητά	10,00	10,00	
03/01/2013 08:12:46	03/01/2013 12:57:33	2013-01-03 12:51:15	3	Μετρητά	16,50	16,50	
03/01/2013 08:24:29	03/01/2013 12:30:07	2013-01-03 12:27:12	37	Μετρητά	16,50	50,00	33,50
03/01/2013 08:29:51	03/01/2013 09:57:11	2013-01-03 09:54:53	33	Μετρητά	11,50	20,00	8,50
03/01/2013 08:40:11	03/01/2013 10:33:55	2013-01-03 10:30:28	37	Μετρητά	11,50	20,00	8,50
03/01/2013 08:40:26	03/01/2013 11:23:18	2013-01-03 11:20:01	37	Μετρητά	12,50	15,00	2,50
03/01/2013 08:41:17	03/01/2013 10:47:12	2013-01-03 10:45:41	37	Μετρητά	12,50	50,00	37,50
03/01/2013 08:50:27	03/01/2013 10:50:12	2013-01-03 10:47:45	3	Μετρητά	11,50	11,50	
03/01/2013 09:09:46	03/01/2013 10:07:28	2013-01-03 10:05:58	33	Μετρητά	10,00	10,00	
03/01/2013 09:22:14	03/01/2013 11:52:00	2013-01-03 11:48:43	33	Μετρητά	12,50	13,00	0,50
03/01/2013 09:28:57	03/01/2013 12:52:23	2013-01-03 12:51:47	3	Μετρητά	14,50	14,50	
03/01/2013 09:42:16	03/01/2013 11:54:58	2013-01-03 11:52:39	33	Μετρητά	12,50	20,00	7,50
03/01/2013 09:49:16	03/01/2013 11:50:43	2013-01-03 11:48:34	3	Μετρητά	10,00	10,00	
03/01/2013 09:51:44	03/01/2013 11:29:55	2013-01-03 11:27:52	37	Μετρητά	11,50	15,00	3,50
03/01/2013 09:57:37	03/01/2013 11:05:56	2013-01-03 11:04:03	37	Μετρητά	11,50	20,00	8,50
03/01/2013 10:29:48	03/01/2013 12:20:55	2013-01-03 12:19:09	37	Μετρητά	11,50	11,50	
03/01/2013 10:30:56	03/01/2013 11:50:14	2013-01-03 11:44:56	33	Μετρητά	11,50	20,00	8,50
03/01/2013 10:48:45	03/01/2013 12:35:49	2013-01-03 12:33:03	37	Μετρητά	11,50	11,50	
03/01/2013 10:53:52	03/01/2013 13:12:27	2013-01-03 13:09:20	33	Μετρητά	12,50	12,50	
03/01/2013 10:56:55	03/01/2013 11:47:51	2013-01-03 11:45:37	37	Μετρητά	10,00	10,00	
03/01/2013 11:07:30	03/01/2013 12:29:12	2013-01-03 12:27:21	3	Μετρητά	11,50	11,50	
03/01/2013 11:29:29	03/01/2013 15:11:15	2013-01-03 15:10:26	3	Μετρητά	14,50	14,50	
03/01/2013 11:32:35	03/01/2013 12:55:47	2013-01-03 12:53:16	33	Μετρητά	11,50	20,00	8,50
03/01/2013 11:44:46	03/01/2013 12:07:42	2013-01-03 12:04:49	33	Μετρητά	10,00	10,00	

Εικόνα 3: Μορφή δεδομένων

Μετά από ενδελεχή έρευνα παρατηρήθηκε πως υπάρχουν αποκλίσεις τόσο στους χρόνους μεταξύ αφίξεων όσο και στους χρόνους εξυπηρέτησης στα διάφορα χρονικά διαστήματα της μέρας. Έτσι αποφασίστηκε να χωριστεί η μέρα σε τέσσερα χρονικά διαστήματα το καθένα από τα οποία μελετήθηκε ξεχωριστά.

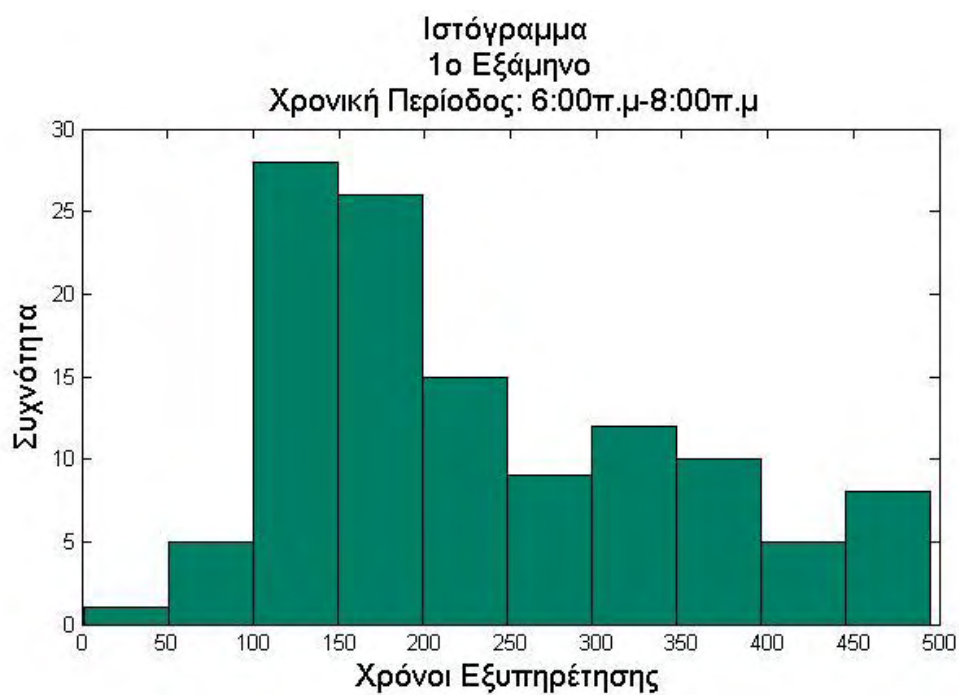
Χρονικά Διαστήματα	Ώρες
I	06:00 π.μ. - 08:00 π.μ.
II	08:00 π.μ. - 10:00 π.μ.
III	10:00 π.μ. - 12:00 μ.μ.
IV	12:00 μ.μ. – 06:00 π.μ.

Πίνακας 1: Χρονικά Διαστήματα

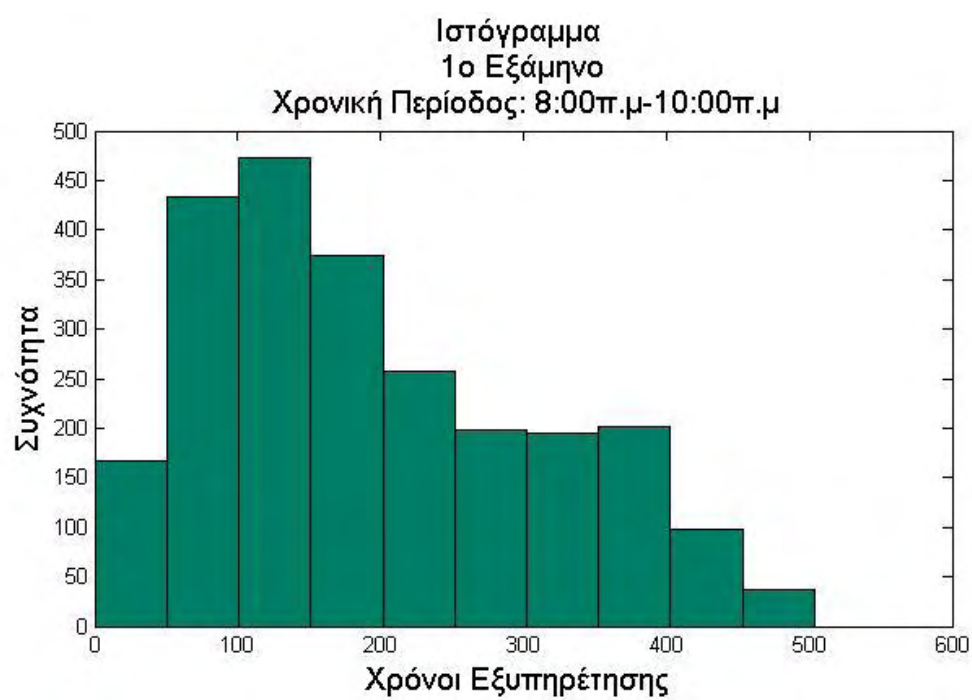
Στη συνέχεια απομονώθηκαν οι παραπάνω χρόνοι για περεταίρω επεξεργασία με σκοπό την εύρεση της καταλληλότερης κατανομής που ακολουθούν. Από την κατανομή που θα προκύψει θα αντλήσουμε σημαντικές πληροφορίες για να καταλήξουμε στον ρυθμό αφίξεων και παραμονής των πελατών που εισέρχονται στο συγκεκριμένο χώρο στάθμευσης που μελετάμε.

Έπειτα δημιουργήθηκαν ιστογράμματα στο πρόγραμμα Matlab. Ως γνωστόν, το ιστόγραμμα είναι ένα γράφημα που αποτελείται από μπάρες, η κάθε μία από αυτές απεικονίζει γραφικά “πόσες φορές” ένα πλήθος αριθμών μιας μεταβλητής αντιπροσωπεύεται από ένα δοσμένο εύρος τιμών. Στόχος της δημιουργίας ήταν να βρούμε από τις μορφές των ιστογραμμάτων τις υποψήφιες κατανομές που προσαρμόζονται στα δεδομένα. Τα ιστογράμματα έγιναν ξεχωριστά για το πρώτο και το δεύτερο εξάμηνο του έτους καθώς και για ολόκληρο το έτος.

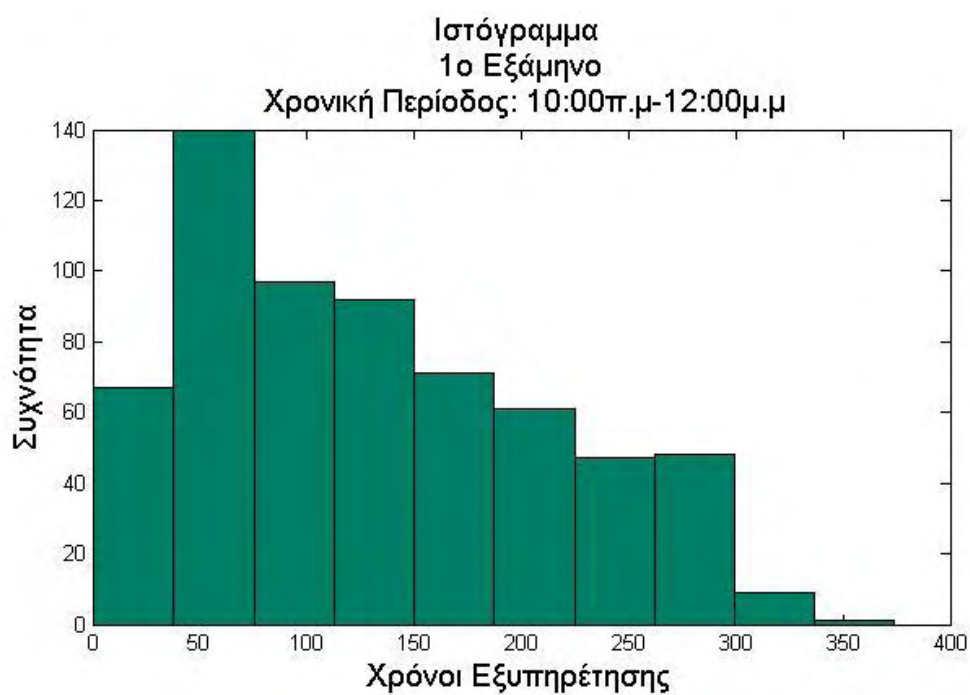
Στην αρχή παρουσιάζονται τα διαγράμματα των παραπάνω περιόδων, για κάθε χρονικό διάστημα ξεχωριστά, για τους χρόνους εξυπηρέτησης και πιο συγκεκριμένα για την παρούσα εφαρμογή χρόνους παραμονής των πελατών στο σύστημα. Παρατηρούμε πως η απόφαση να χωρίσουμε τη κάθε μέρα σε τέσσερα χρονικά διαστήματα μελέτης ήταν αρκετά εύστοχη κι αυτό επιβεβαιώνεται από το γεγονός ότι οι συχνότητες έχουν μεγάλες αποκλίσεις. Για παράδειγμα, στο διάστημα i του πρώτου εξαμήνου η μέγιστη συχνότητα εξυπηρέτησης πελατών φτάνει τους 28 μεταξύ 100-150 λεπτών, σε αντίθεση με το διάστημα ii που η συχνότητα ανέρχεται στους 470 στα αντίστοιχα λεπτά. Στη συνέχεια ακολουθούν τα διαγράμματα των ίδιων προαναφερθεισών περιόδων, για κάθε χρονικό διάστημα ξεχωριστά και για τους χρόνους μεταξύ αφίξεων. Όπως μπορεί κανείς να διαπιστώσει στο διάστημα ii του δευτέρου εξαμήνου η πλειοψηφία των πελατών φθάνει στο χώρο στάθμευσης με διαφορά μικρότερη του ενός λεπτού και ανέρχεται στα 850 άτομα, ενώ στο διάστημα i οι πελάτες εισέρχονται πιο αραιά. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα ιστογράμματα που δημιουργήσαμε.



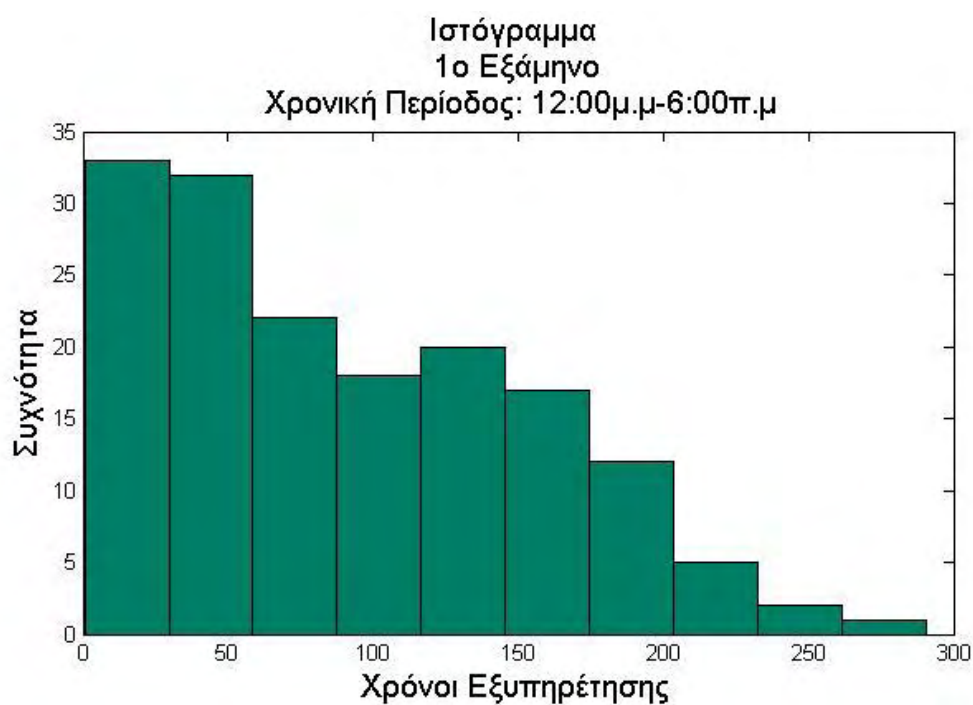
Εικόνα 4:Ιστόγραμμα για το i χρονικό διάστημα του 1<sup>ου</sup> εξαμήνουγια τους χρόνους εξυπηρέτησης



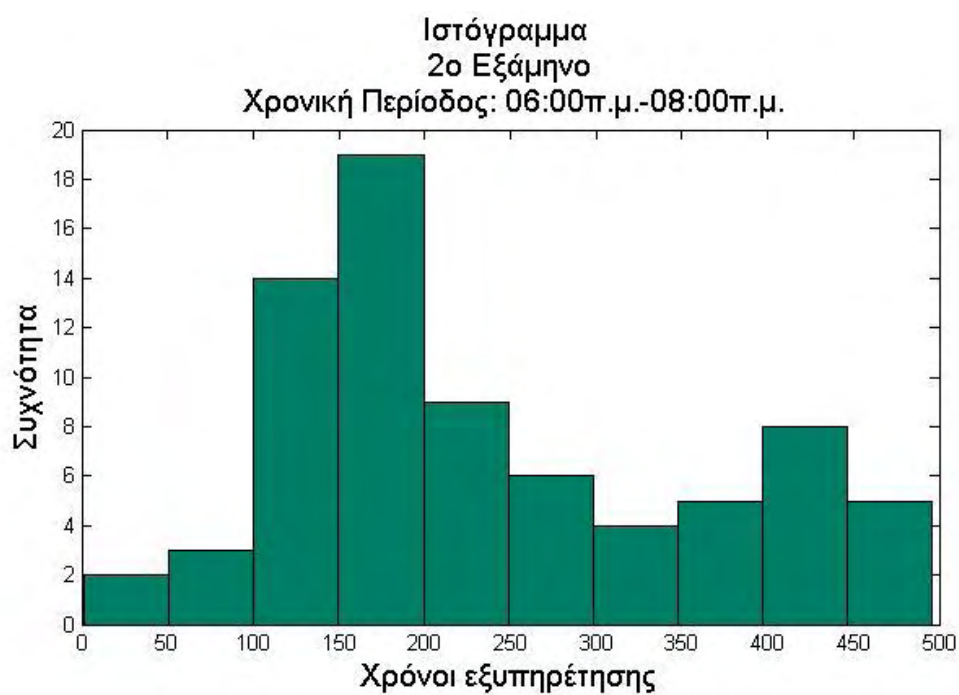
Εικόνα 5:Ιστόγραμμα για το ii χρονικό διάστημα του 1<sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους εξυπηρέτησης



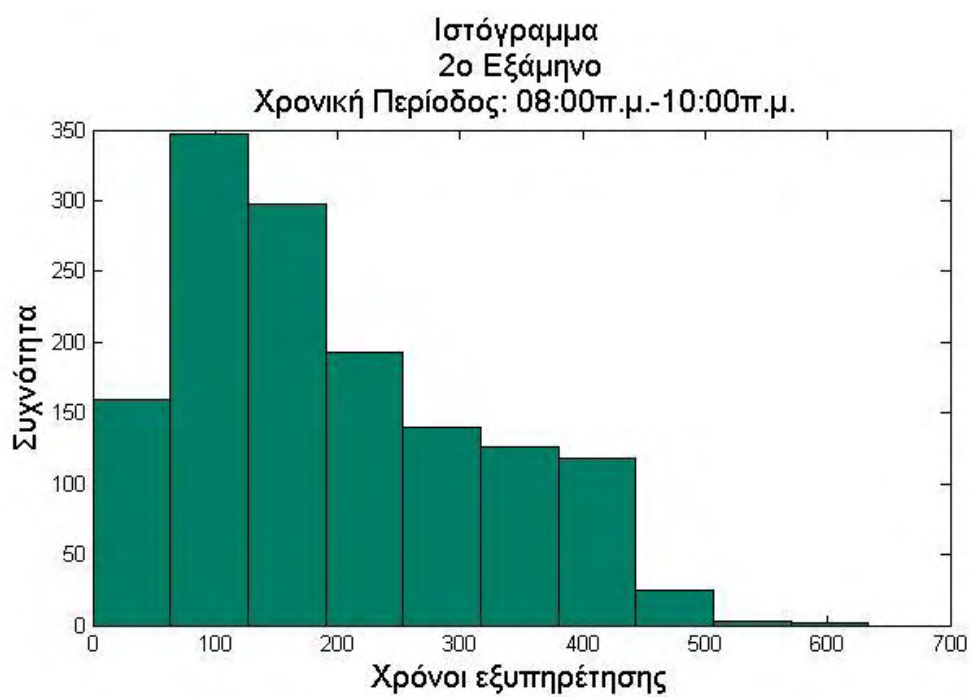
Εικόνα 6: Ιστόγραμμα για το iii χρονικό διάστημα του 1<sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους εξυπηρέτησης



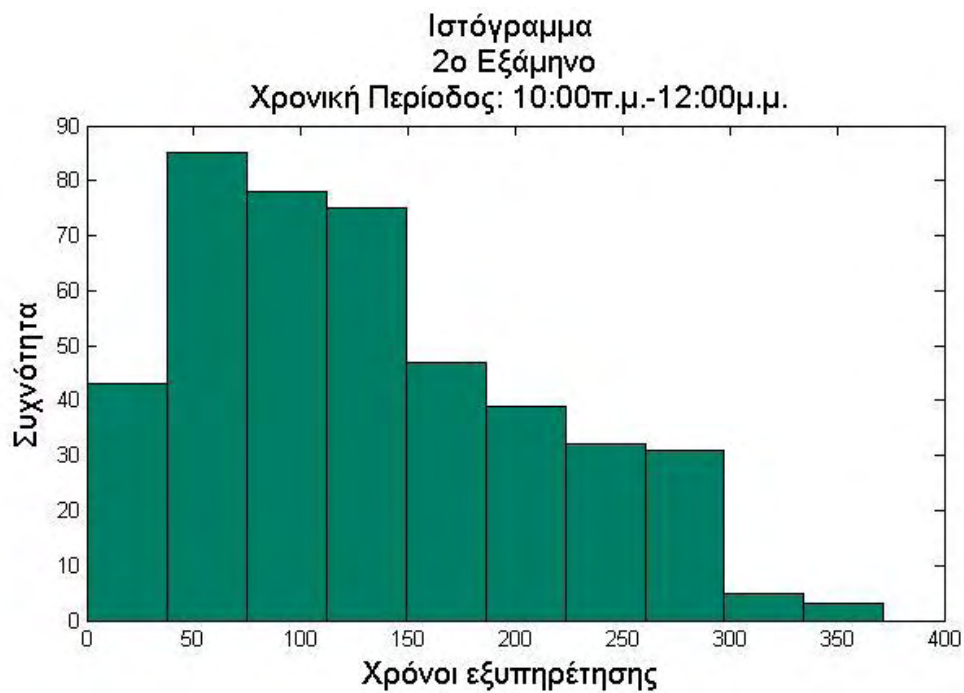
Εικόνα 7: Ιστόγραμμα για το iv χρονικό διάστημα του 1ου εξαμήνου για τους χρόνους εξυπηρέτησης



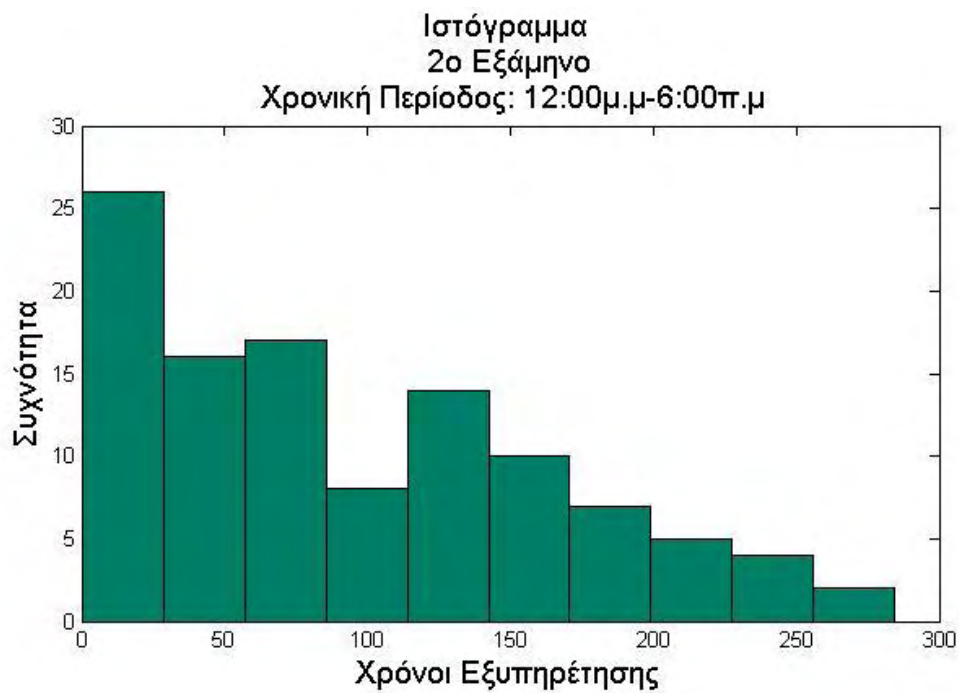
Εικόνα 8:Ιστόγραμμα για το i χρονικό διάστημα του 2<sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους εξυπηρέτησης



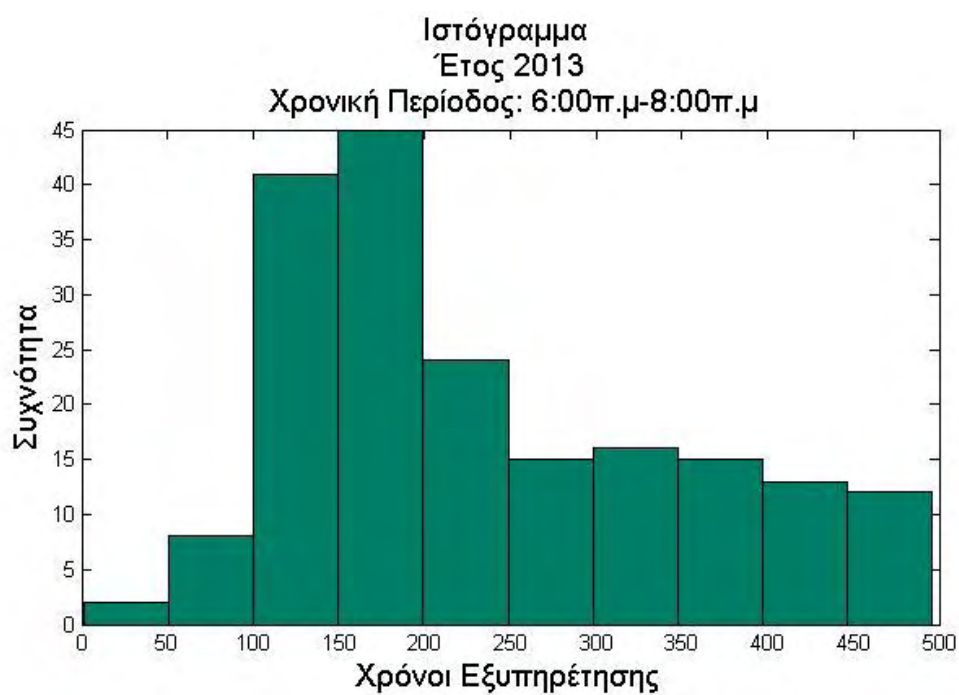
Εικόνα 9:Ιστόγραμμα για το ii χρονικό διάστημα του 2<sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους εξυπηρέτησης



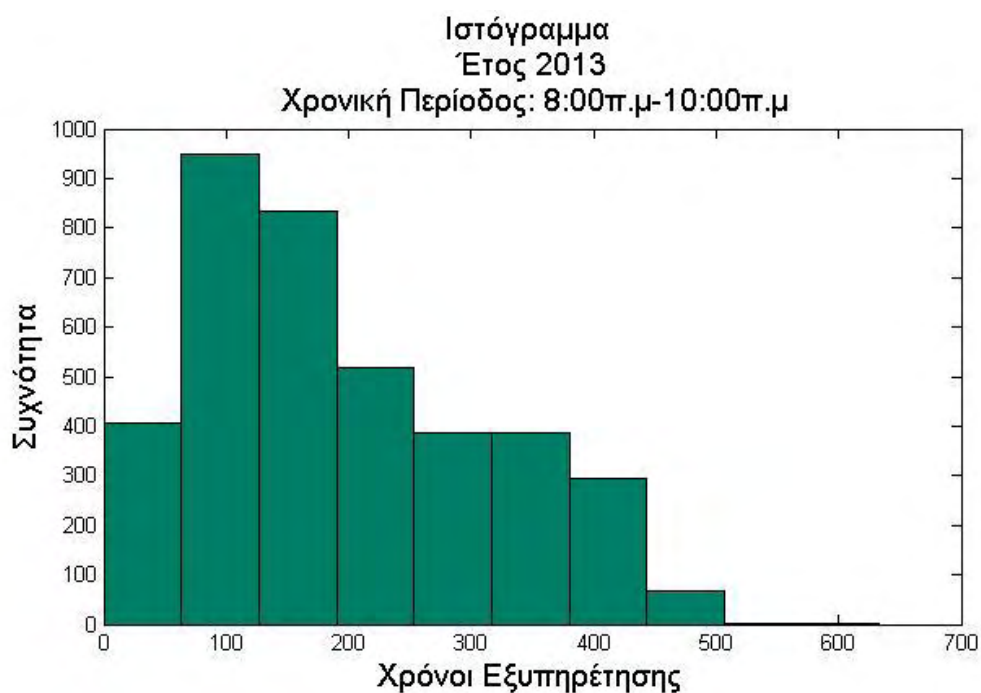
Εικόνα 10: Ιστόγραμμα για το iii χρονικό διάστημα του 2<sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους εξυπηρέτησης



Εικόνα 11: Ιστόγραμμα για το iv χρονικό διάστημα του 2<sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους εξυπηρέτησης

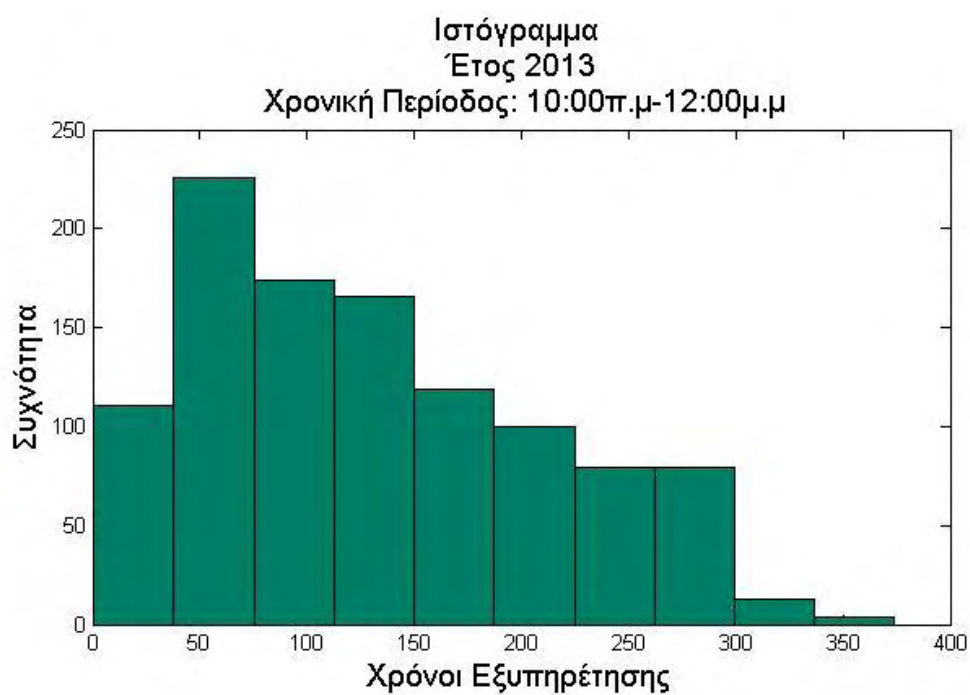


Εικόνα 12: Ιστόγραμμα για το i χρονικό διάστημα ολόκληρου του έτους για τους χρόνους εξυπηρέτησης



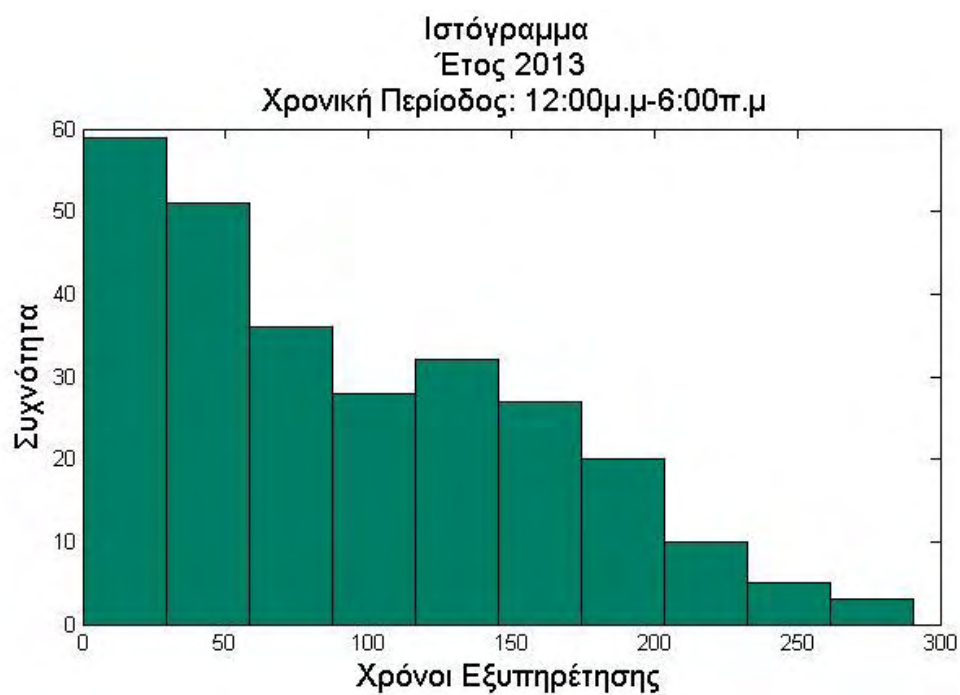
Εικόνα 13: Ιστόγραμμα για το ii χρονικό διάστημα ολόκληρου του έτους για τους χρόνους εξυπηρέτησης



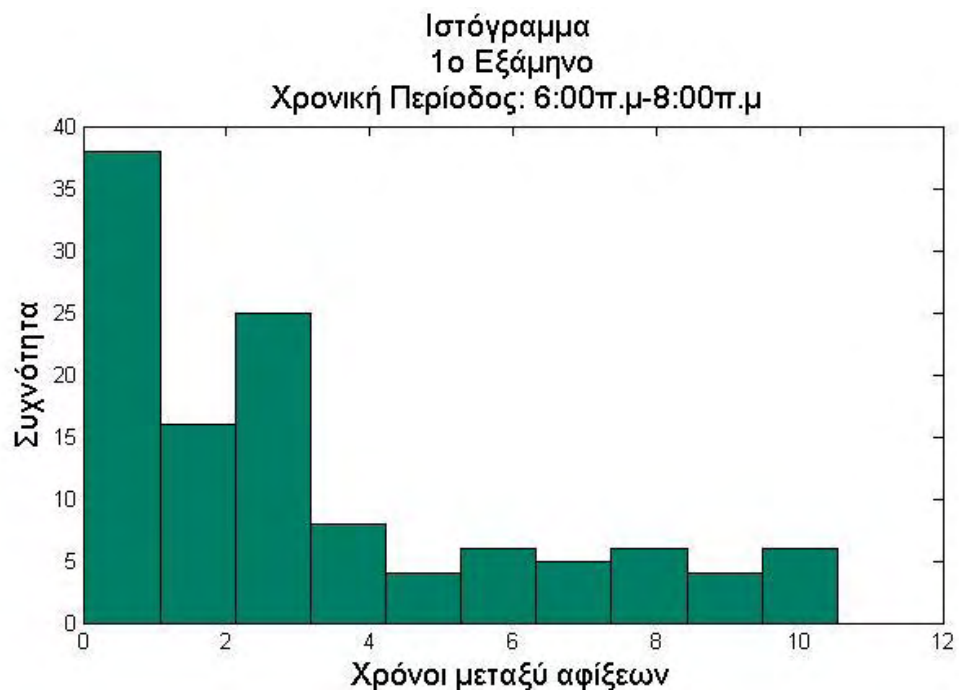


Εικόνα 14:Ιστόγραμμα για το iii χρονικό διάστημα ολόκληρου του έτους για τους χρόνους εξυπηρέτησης

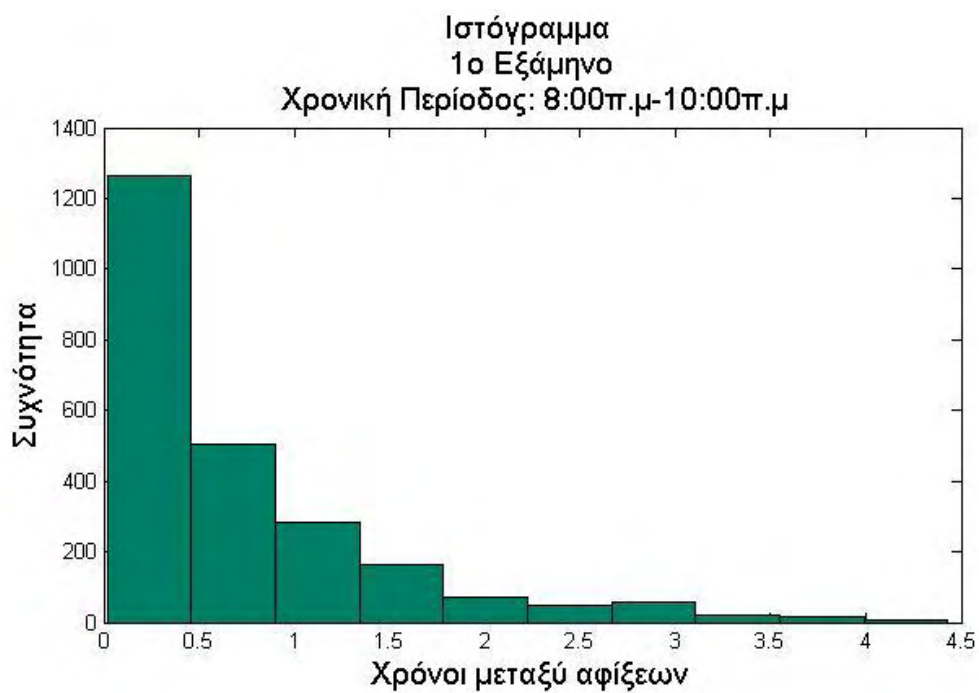
ι



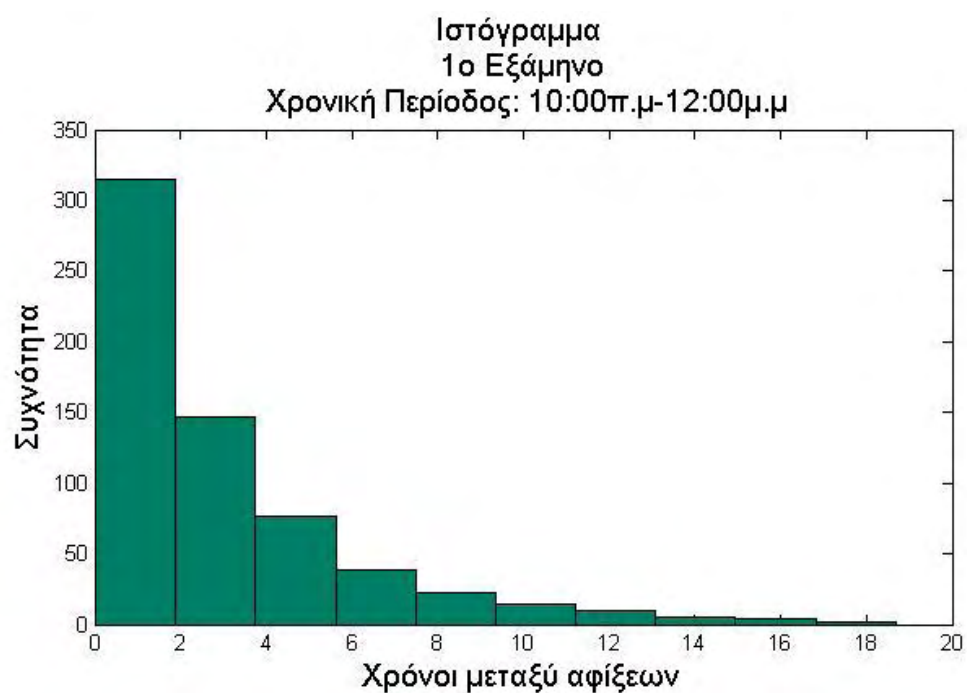
Εικόνα 15:Ιστόγραμμα για το iv χρονικό διάστημα ολόκληρου του έτους για τους χρόνους εξυπηρέτησης



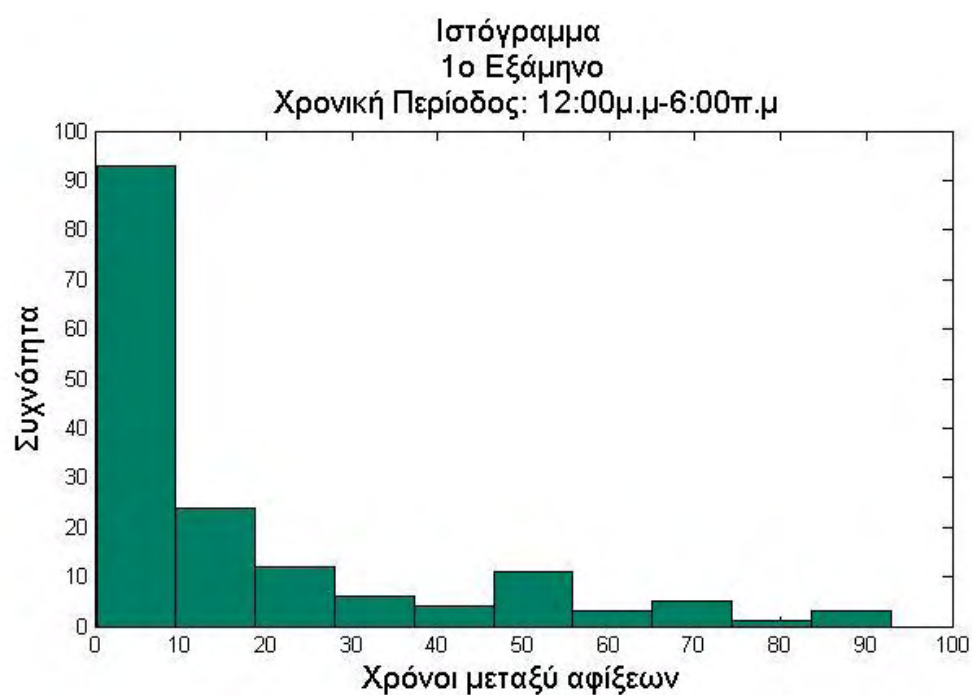
Εικόνα 16: Ιστόγραμμα για το i χρονικό διάστημα του 1<sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους μεταξύ αφίξεων



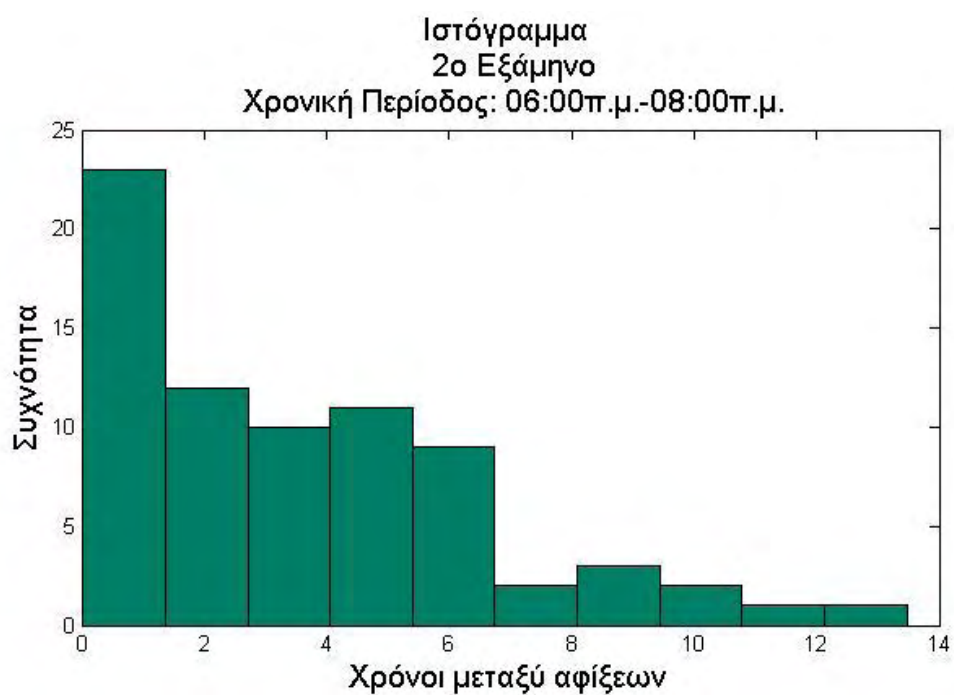
Εικόνα 17: Ιστόγραμμα για το ii χρονικό διάστημα του 1<sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους μεταξύ αφίξεων



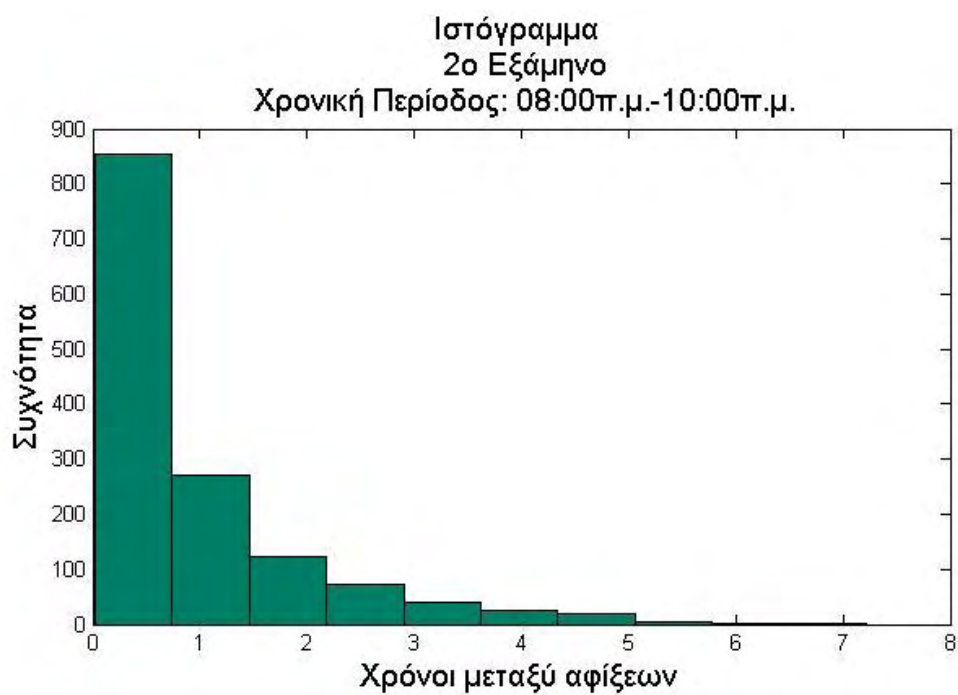
Εικόνα 18:Ιστόγραμμα για το iii χρονικό διάστημα του 1<sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους μεταξύ αφίξεων



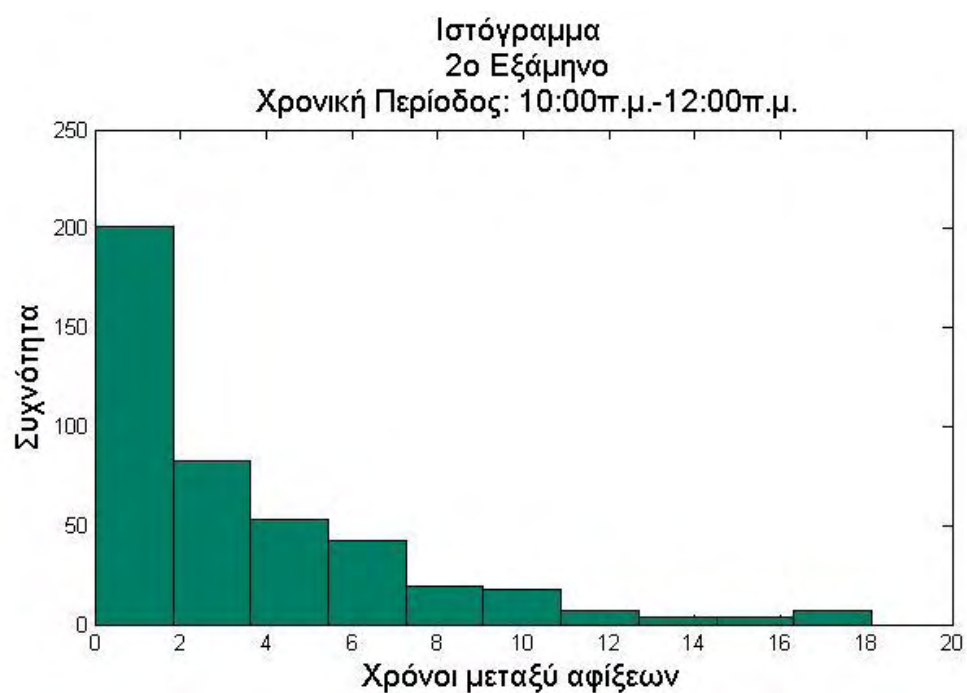
Εικόνα 19:Ιστόγραμμα για το iv χρονικό διάστημα του 1<sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους μεταξύ αφίξεων



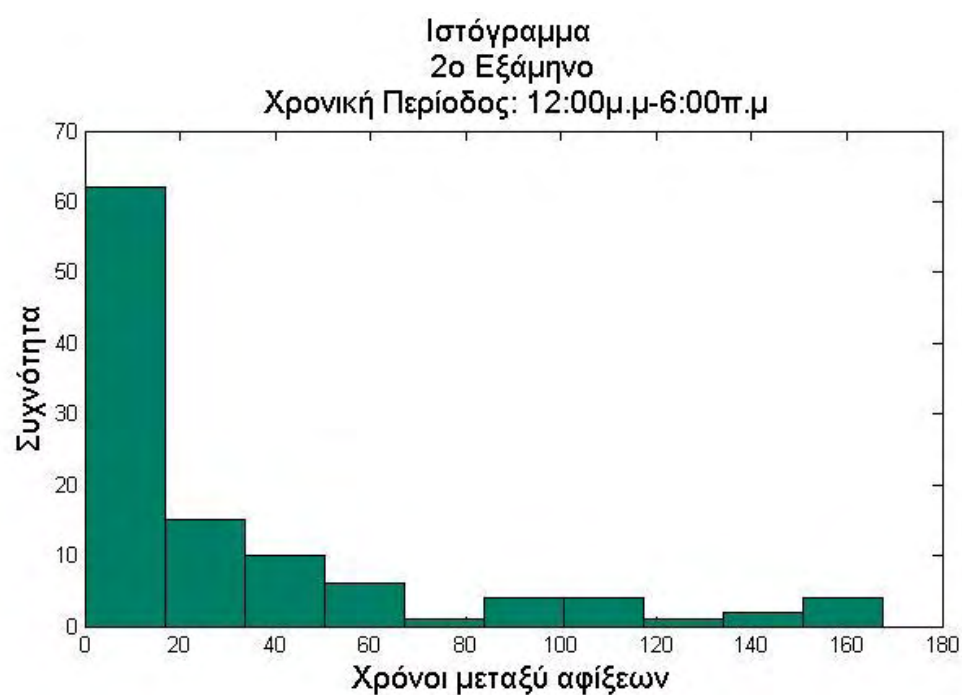
Εικόνα 20:Ιστόγραμμα για το i χρονικό διάστημα του 2<sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους μεταξύ αφίξεων



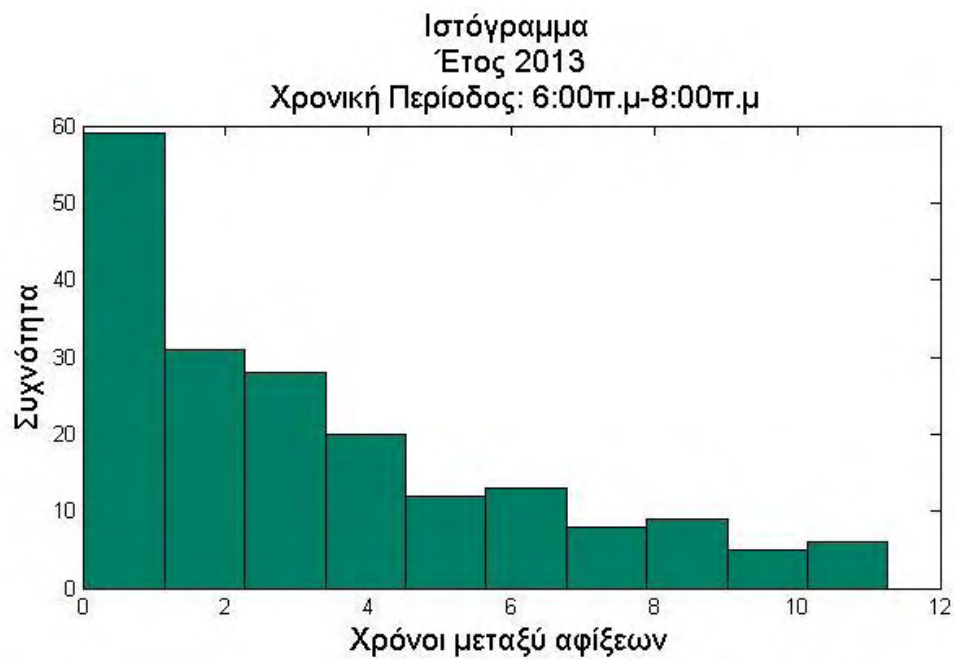
Εικόνα 21:Ιστόγραμμα για το ii χρονικό διάστημα του 2<sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους μεταξύ αφίξεων



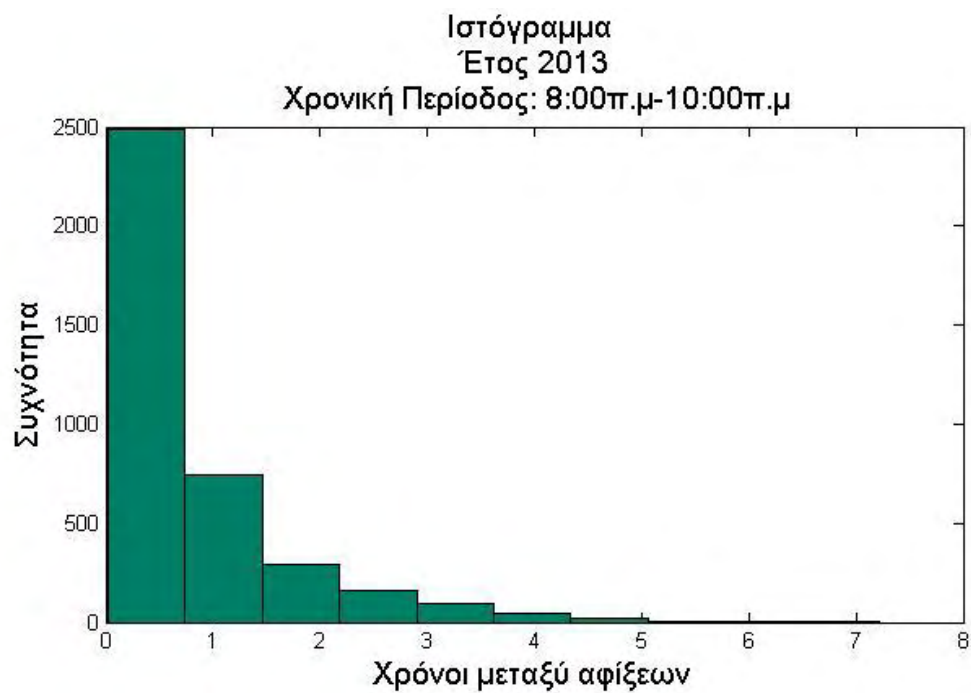
Εικόνα 22:Ιστόγραμμα για το iii χρονικό διάστημα του 2<sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους μεταξύ αφίξεων



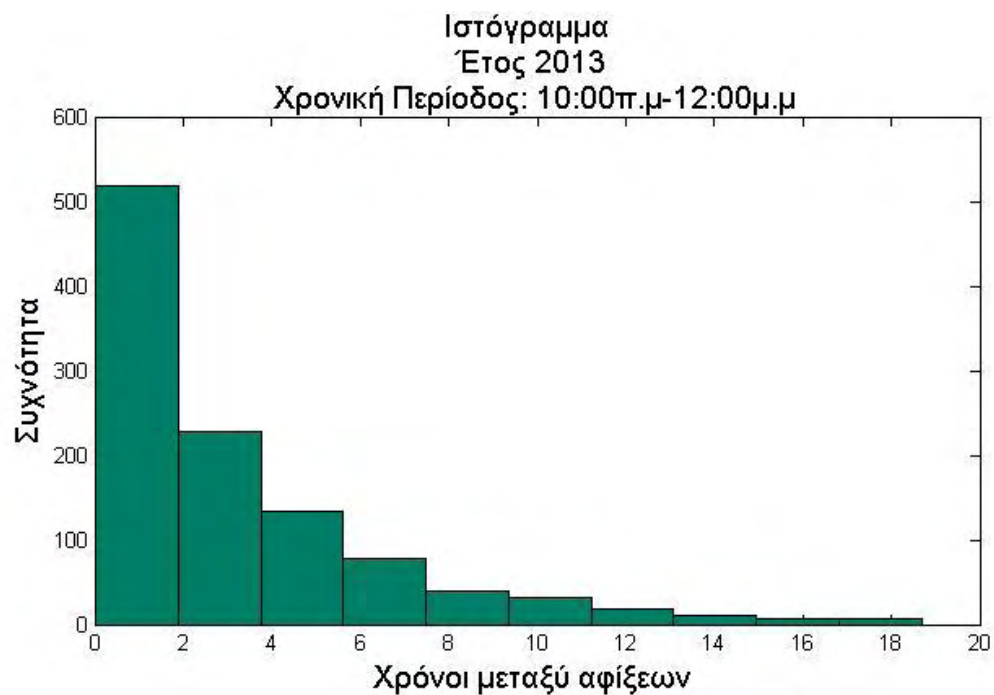
Εικόνα 23:Ιστόγραμμα για το iv χρονικό διάστημα του 2<sup>ου</sup> εξαμήνου για τους χρόνους μεταξύ αφίξεων



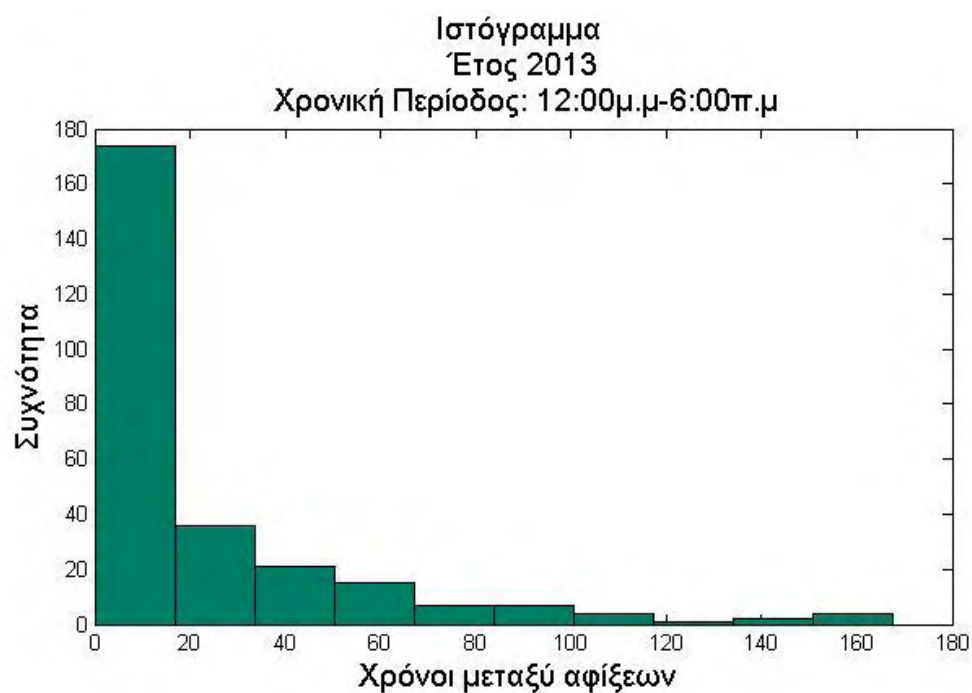
Εικόνα 24: Ιστόγραμμα για το i χρονικό διάστημα ολόκληρου του έτους για τους χρόνους μεταξύ αφίξεων



Εικόνα 25: Ιστόγραμμα για το ii χρονικό διάστημα ολόκληρου του έτους για τους χρόνους μεταξύ αφίξεων



Εικόνα 26: Ιστόγραμμα για το iii χρονικό διάστημα ολόκληρου του έτους για τους χρόνους μεταξύ αφίξεων



Εικόνα 27: Ιστόγραμμα για το iv χρονικό διάστημα ολόκληρου του έτους για τους χρόνους μεταξύ αφίξεων

Η στατιστική μελέτη σε δεύτερο στάδιο υλοποιήθηκε στο στατιστικό πακέτο SPSS Statistic 17.0, το οποίο ελέγχει τα δεδομένα για καλή προσαρμογή στην κανονική, εκθετική και ομοιόμορφη κατανομή. Στο SPSS πραγματοποιήθηκαν μη παραμετρικοί έλεγχοι και συγκεκριμένα ο Kolmogorov-Smirnov (K-S). Από τους ελέγχους καμία κατανομή δεν προσαρμόζεται ικανοποιητικά στα δεδομένα μας και για αυτό το λόγο ανατρέξαμε σε άλλο πρόγραμμα. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήσαμε το Input Analyzer του λογισμικού προσομοίωσης Arena, το οποίο ελέγχει την προσαρμογή διαφόρων κατανομών στα δεδομένα τα οποία θα εισάγει ο χρήστης μέσω των κριτηρίων Kolmogorov-Smirnov (K-S), Chi-Square και Min Error, και προτείνει την κατανομή που προσαρμόζεται καλύτερα. Όμως ακόμη και για αυτήν την κατανομή το p-value ήταν πολύ μικρό, πράγμα που σημαίνει πως καμία κατανομή δεν προσαρμόζεται ικανοποιητικά στα δεδομένα μας. Η ενδεδειγμένη λύση θα ήταν να χρησιμοποιήσουμε μια εμπειρική κατανομή που θα προέκυπτε από τα ιστογράμματα. Όμως για λόγους απλότητας και βάσει της μορφής των ιστογραμμάτων επιλέξαμε την εκθετική κατανομή για τους χρόνους μεταξύ αφίξεων και την κατανομή Weibull για τους χρόνους παραμονής. Οι παράμετροι των κατανομών αυτών δίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Εκθετική Κατανομή		
Χρονικά διαστήματα	Ρυθμός άφιξης	Μέση τιμή
06:00 π.μ. - 08:00 π.μ.	0.097917	10.21
08:00 π.μ. - 10:00 π.μ.	1.34375	0.744
10:00 π.μ. - 12:00 μ.μ.	0.340833	2.93
12:00 μ.μ. - 06:00 π.μ.	0.010139	98.6

Πίνακας 2: Παράμετροι εκθετικής κατανομής για χρόνους μεταξύ αφίξεων

Κατανομή Weibull			
Χρονικά διαστήματα	Παράμετρος κλίμακας	Παράμετρος σχήματος	Μέση τιμή
06:00 π.μ. -08:00 π.μ.	263	2.12	232.925
08:00 π.μ. -10:00 π.μ.	217	1.91	192.5262
10:00 π.μ. -12:00 μ.μ.	148	1.63	132.4758
12:00 μ.μ. - 06:00 π.μ.	95,5	0.931	98.7118

Πίνακας 3: Παράμετροι κατανομής Weibull για χρόνους παραμονής



## 2.3 Μοντέλο συναλλαγών

Ένα άλλο τμήμα του μοντέλου όπου υπεισέρχεται τυχαιότητα αφορά το ποσό των χρημάτων που δίνει ο πελάτης από το οποίο προκύπτει το ποσόν που δίνει το μηχάνημα ως ρέστα. Για να καταλήξουμε σε αυτό χρειάζεται καταρχάς να γνωρίζουμε την τιμολογιακή πολιτική ώστε να υπολογίσουμε την εκάστοτε χρέωση του πελάτη. Ο τιμοκατάλογος δίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Τιμοκατάλογος(€)	
0-10 λεπτά	Δωρεάν
11-60 λεπτά	8,00
1-2 ώρες	9,00
2-3 ώρες	10,50
3-4 ώρες	12,50
4-5 ώρες	13,50
5-6 ώρες	15,00
6-7 ώρες	16,00
7-8 ώρες	17,00
8-24 ώρες	17,00

Πίνακας 4:Τιμοκατάλογος της εταιρίας Cityzen

Αφού υπολογιστεί η χρέωση του πελάτη σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, πρέπει να προσδιοριστεί το ποσό με το οποίο πληρώνει ο πελάτης. Μελετώντας τις χρεώσεις καθώς και τα χρήματα που δίνει ο πελάτης στα δεδομένα που μας δόθηκαν από την εταιρία, προέκυψαν οι πιθανότητες που φαίνονται στον Πίνακα 5. Οι υπολογισμοί αυτοί πραγματοποιήθηκαν στο Excel.

Χρεώσεις	Ποσό που δίνει ο πελάτης	Πιθανότητα
<b>Χρέωση ≤10€</b>	10€	0,67
	20€	0,24
	50€	0,07
	Ακριβώς	0,02
<b>10€ &lt; Χρέωση ≤15€</b>	15€	0,14
	20€	0,48
	50€	0,09
	Ακριβώς	0,2
	Στρογγυλοποιημένη τη χρέωση (προς τα πάνω)	0,09
<b>15€ &lt; Χρέωση ≤20€</b>	20€	0,57
	50€	0,14
	Ακριβώς	0,24
	Στρογγυλοποιημένη τη χρέωση (προς τα πάνω)	0,04

Πίνακας 5: Πιθανότητα να πληρώσει ο πελάτης με μια από τις παραπάνω χρηματικές αξίες ανάλογα με τη χρέωση

## Κεφάλαιο 3

### 3.1 Επεξήγηση Αλγορίθμου

Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε ο Αλγόριθμος Προγραμματισμού Γεγονότων. Ο αλγόριθμος ξεκινά με τον υπολογισμό του χρόνου της πρώτης άφιξης και σε κάθε επόμενο βήμα υπολογίζει το χρόνο του εκάστοτε γεγονότος, άφιξης ή αναχώρησης. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται με τη χρήση γεννήτριας τυχαίων αριθμών. Ο χρόνος αυτός εισέρχεται σε έναν πίνακα λίστας επόμενων γεγονότων με την ονομασία FEL ο οποίος αποτελείται από τρεις στήλες. Το πρώτο στοιχείο κατά γραμμή είναι ο χρόνος  $t$ , το δεύτερο στοιχείο μπορεί να πάρει την τιμή 1 όταν έχουμε άφιξη τον χρόνο  $t$  ή την τιμή 2 όταν έχουμε αναχώρηση και τέλος, το τρίτο στοιχείο μας δείχνει τον χρόνο παραμονής στο σύστημα εφόσον γίνεται αναχώρηση την  $t$  χρονική στιγμή. Ως γνωστόν σε έναν αλγόριθμο προσομοίωσης υπάρχει ένας χρόνος ο οποίος καθορίζει τη διάρκεια της προσομοίωσης. Όσο λοιπόν το  $t$  είναι μικρότερο από αυτόν τον εν λόγω χρόνο η προσομοίωση συνεχίζεται.

Αν ο χρόνος  $t$  αντιστοιχεί σε άφιξη πελάτη υπολογίζουμε το χρόνο αναχώρησης του πελάτη προσθέτοντας μια τυχαία τιμή με χρήση γεννήτριας της κατανομής Weibull και εισάγουμε τις τιμές αυτές στη FEL. Επίσης υπολογίζουμε το χρόνο άφιξης του επόμενου πελάτη σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία (Ross, 1989). Αν ο χρόνος  $t$  ανήκει στο διάστημα  $i$  παίρνουμε μια τυχαία τιμή  $x$  με χρήση της γεννήτριας της εκθετικής κατανομής με ρυθμό  $\lambda_i$ . Αν  $t+x$  ανήκει στο διάστημα  $i$  τότε ο χρόνος  $t+x$  είναι ο χρόνος της επόμενης άφιξης. Διαφορετικά τροποποιούμε την τιμή  $x$  έτσι ώστε το μέρος που ανήκει στο διάστημα  $i+1$  να αντιστοιχεί σε εκθετική κατανομή με ρυθμό  $\lambda_{i+1}$ . Συγκεκριμένα, πολλαπλασιάζουμε το μέρος αυτό με  $\lambda_i / \lambda_{i+1}$ . Η τιμή που προκύπτει προστίθεται στη FEL.

Αν ο χρόνος  $t$  αντιστοιχεί σε αναχώρηση πελάτη, υπολογίζεται η χρέωση με βάση το χρόνο παραμονής του στο σύστημα. Κατόπιν, σύμφωνα με τις πιθανότητες που είχαν υπολογιστεί στην επεξεργασία των δεδομένων προκύπτει το ποσόν που θα δώσει ο πελάτης και τέλος τα ρέστα που θα πάρει. Ο αλγόριθμος ελέγχει αν υπάρχουν διαθέσιμα ρέστα. Αν όχι, ο αλγόριθμος τερματίζεται. Αν ναι, ο πίνακας FEL που αναφέρθηκε παραπάνω αναδιατάσσεται, δηλαδή οι χρόνοι που υπάρχουν στην πρώτη στήλη ταξινομούνται κατά αύξουσα σειρά και έτσι το πρώτο στοιχείο κατά γραμμή που προκύπτει είναι ο χρόνος του επόμενου γεγονότος, και η προσομοίωση συνεχίζεται.

Με το πέρας του χρόνου προσομοίωσης υπολογίζονται αναλυτικά οι ποσότητες από κάθε νόμισμα και χαρτονόμισμα που έχουν απομείνει στο μηχάνημα αυτόματων συναλλαγών, το συνολικό ποσό καθώς και άλλα ακόμη στοιχεία που μας οδηγούν στην εξαγωγή ποικίλων συμπερασμάτων.

### 3.2 Ανάλυση αλγορίθμου

Στα πλαίσια της μελέτης μας αναπτύξαμε έναν αλγόριθμο προσομοίωσης. Σε αυτό το υποκεφάλαιο αρχικά επεξηγούνται αναλυτικά οι συναρτήσεις (functions) για την περεταίρω κατανόηση του αλγορίθμου. Οι συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση του προαναφερθέντος αλγορίθμου είναι οι εξής:

**Charge\_function:** Υπολογίζει τη χρέωση του εκάστοτε πελάτη συναρτήσει του χρόνου παραμονής του στο χώρο στάθμευσης σύμφωνα με τον τιμοκατάλογο της εταιρίας.

**Money\_function:** Υπολογίζει το ποσό το οποίο θα πληρώσει ο πελάτης συναρτήσει της χρέωσης. Ο υπολογισμός γίνεται με τη χρήση γεννήτριας τυχαίων αριθμών, με βάση πιθανότητες που προέκυψαν από τη στατιστική μελέτη που έγινε στα δεδομένα που δόθηκαν από την εταιρία.

**Change\_function:** Υπολογίζει την ποσότητα από κάθε χαρτονόμισμα-νόμισμα ξεχωριστά που θα δοθεί για ρέστα συναρτήσει του συνολικού ποσού που πρέπει να δοθεί και του υπάρχοντος αποθέματος.

**simulation\_code**



**charge\_function**



**money\_function**

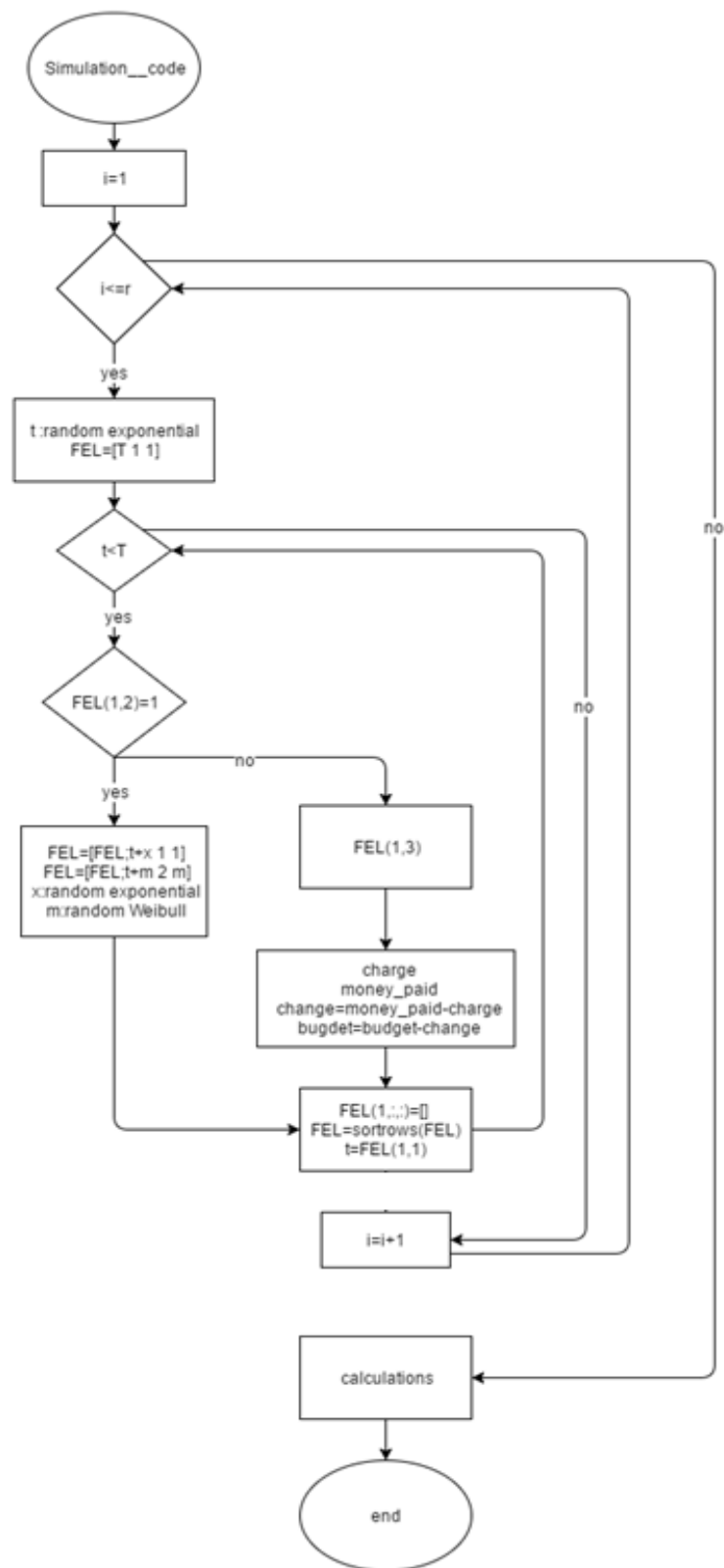


**change\_function**

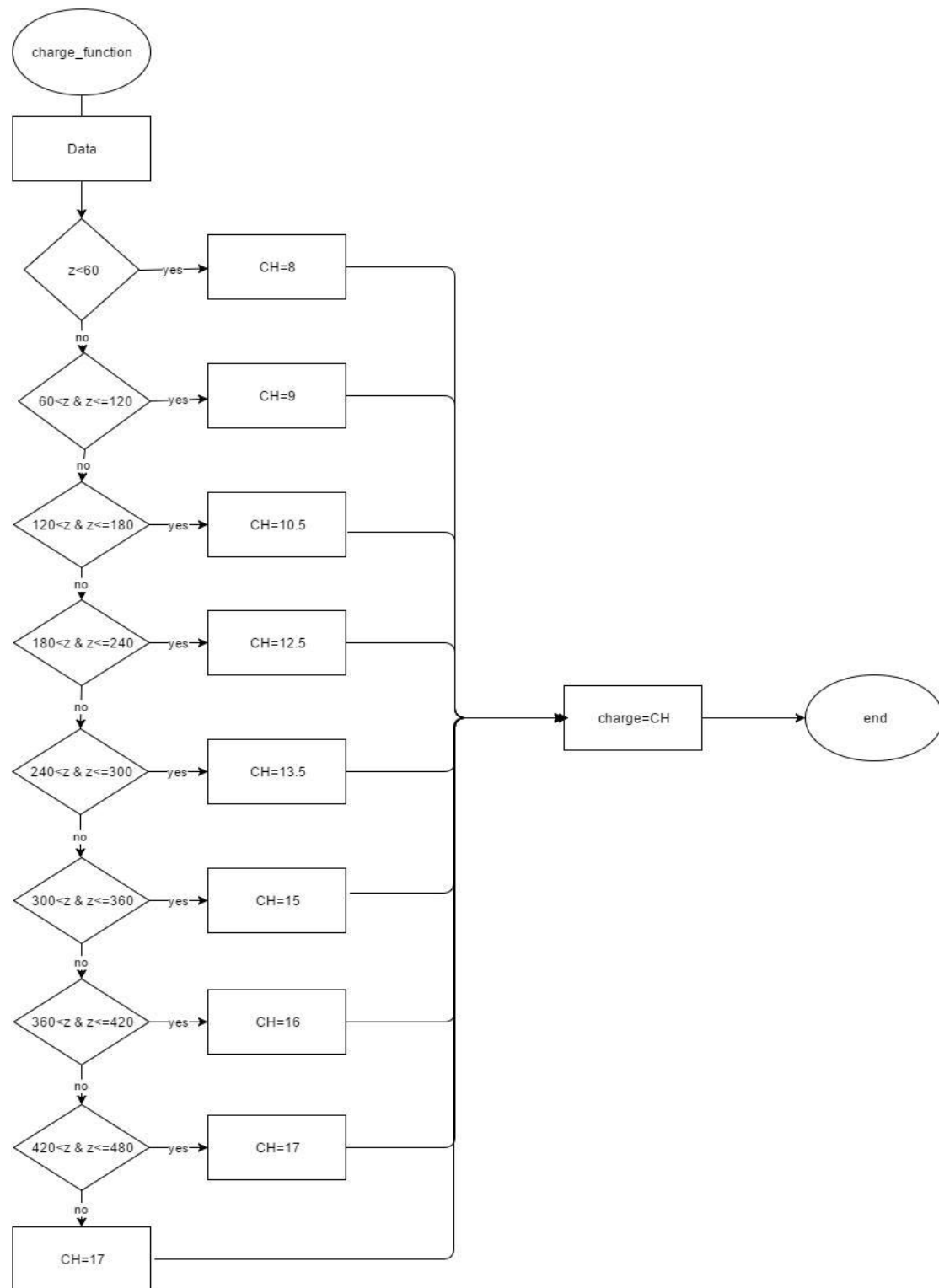
Εικόνα28: Αναπαράσταση του αλγορίθμου simulation\_code

### 3.3 Διάγραμμα ροής

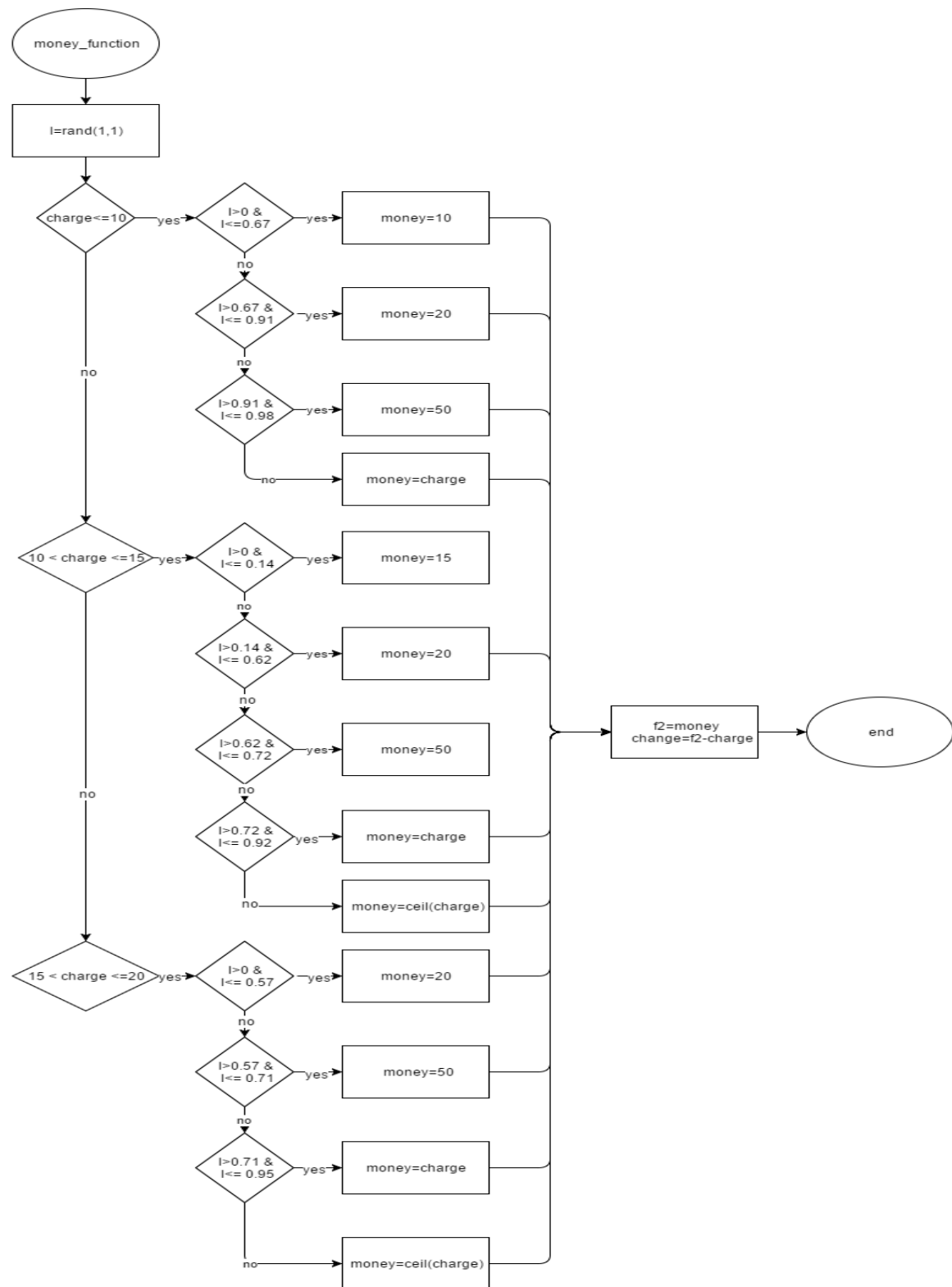
Το Διάγραμμα ροής (flowchart) είναι ένα είδος διαγράμματος που αναπαριστά τα βήματα ενός αλγορίθμου με τη μορφή διαφόρων σχημάτων που συνδέονται μεταξύ τους με βέλη. Η φορά του βέλους θα δείχνει κάθε φορά τη ροή των δεδομένων. Χρησιμοποιείται για ευρύτερη κατανόηση του αλγορίθμου και εν συνεχεία των βημάτων που συντελούν στην επίλυση του προβλήματος. Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα ροής για τον αλγόριθμο της προσομοίωσης και τις συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται.



Εικόνα 28: Διάγραμμα ροής για τον κώδικα προσομοίωσης

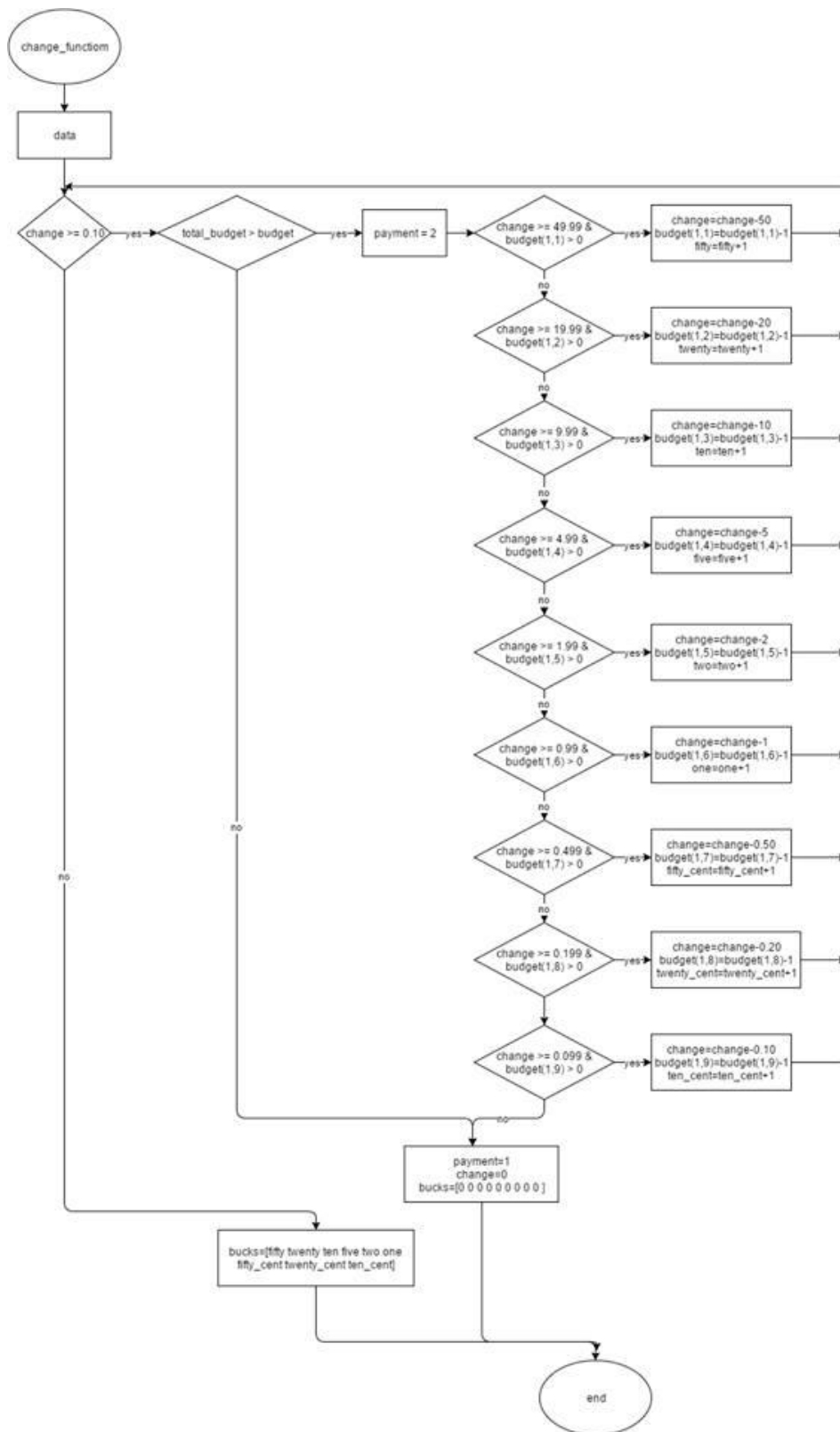


Εικόνα 29: Διάγραμμα ροής για την συνάρτηση χρεώσεων, όπου ζείναι ο χρόνος παραμονής του κάθε πελάτη στο σύστημα



Εικόνα 30: Διάγραμμα ροής της συνάρτησης των εισαχθέντων χρημάτων





Εικόνα 31: Διάγραμμα ροής της συνάρτησης που υπολογίζει τα ρέστα

## Κεφάλαιο 4 Αποτελέσματα

Η προσομοίωση εκτελέστηκε για διάφορα σενάρια τα οποία, όσον αφορά το πλάνο αναπλήρωσης χρημάτων βασίστηκαν στην παρούσα πολιτική της εταιρίας. Σύμφωνα με την πολιτική αυτή, ο ανεφοδιασμός του κάθε μηχανήματος αυτόματων συναλλαγών γίνεται συνήθως μια φορά την εβδομάδα και είναι άμεσα εξαρτώμενος από την κίνηση πληρωμών που δέχεται το μηχάνημα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το ποσό που γεμίζει το μηχάνημα αυτόματων συναλλαγών ανέρχεται στα 2830€. Οι επιμέρους ποσότητες κερμάτων και χαρτονομισμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6. Στηριζόμενοι στο παραπάνω σχέδιο ανεφοδιασμού πραγματοποιήσαμε εφαρμογές κάνοντας διάφορες παραλλαγές για συγκεκριμένο προϋπολογισμό χρημάτων και χρόνο, διατηρώντας την ίδια αναλογία μεταξύ τους. Παραδείγματος χάριν στον Πίνακα 8 παρατηρούμε πως έγινε ένα παράδειγμα για 5 μέρες και 8490€ αρχικό προϋπολογισμό χρημάτων και συγκρίνεται με ένα παράδειγμα για 10 μέρες και διπλάσιο αρχικό προϋπολογισμό χρημάτων 16980€.

	Χρηματικές Αξίες(€)	Ποσότητες Ανεφοδιασμού
<b>Κέρματα</b>	0,10	50
	0,50	250
	1,00	300
	2,00	400
<b>Χαρτονομίσματα</b>	5,00	100
	10,00	50
	20,00	30

Πίνακας 6: Ποσότητες ανεφοδιασμού για κέρματα και χαρτονομίσματα

Για κάθε σενάριο έγιναν 1000 επαναλήψεις οι οποίες χωρίστηκαν σε 10 ομάδες των 100. Σε κάθε ομάδα υπολογίζουμε την πιθανότητα να εξαντληθεί το μηχάνημα από ρέστα. Με αυτό τον τρόπο προκύπτει ένα δείγμα 10 τιμών γι' αυτήν την πιθανότητα από την οποία υπολογίζουμε ένα 95% διάστημα εμπιστοσύνης. Το διάστημα εμπιστοσύνης χρησιμοποιείται για ασφαλέστερη εκτίμηση μιας παραμέτρου ενός πληθυσμού με βάση ένα τυχαίο δείγμα από τον πληθυσμό αυτό.

Στην περίπτωση που εξαντλούνται τα χρήματα, υπολογίζεται η χρονική στιγμή που συμβαίνει αυτό. Επομένως, η μέση τιμή του πραγματικού χρόνου ανεφοδιασμού δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$mean\_W = mean\_Q * mean\_p + T *(1-mean\_p)$$

όπου  $W$ :πραγματικός χρόνος ανεφοδιασμού

$T$ : χρόνος προσομοίωσης

$Q$ :χρονική στιγμή που εξαντλείται το μηχάνημα από ρέστα

$p$ :πιθανότητα να εξαντληθεί το μηχάνημα από ρέστα.

Οι ποσότητες που απομένουν από κάθε νόμισμα και χαρτονόμισμα καθώς και το συνολικό ποσό αφορούν τις περιπτώσεις που το μηχάνημα εξυπηρέτησε όλους τους πελάτες χωρίς να εξαντληθούν τα ρέστα του.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα διάφορα σενάρια για χρόνο προσομοίωσης πέντε και δέκα μέρες αντίστοιχα, παρουσιάζονται στους Πίνακες 8, 9. Παρατηρούμε και στους δύο πίνακες πως οι πελάτες που εισέρχονται στον συγκεκριμένο χώρο στάθμευσης στις δέκα μέρες όπως αναμέναμε είναι περίπου διπλάσιοι από αυτούς στις πέντε μέρες. Όσον αφορά τον πραγματικό χρόνο ανεφοδιασμού, πάλι ο αλγόριθμος για δέκα μέρες εμφανίζει καλύτερα αποτελέσματα καθώς τα χρήματα εξαντλούνται αργότερα αναλογικά με τις πέντε μέρες.

Για τα σενάρια που αντιστοιχούν στον Πίνακα 8 παρατηρούμε ότι είναι πιθανόν τα χρήματα του μηχανήματος να εξαντληθούν πριν από την προγραμματισμένη αναπλήρωση. Όσον αφορά τον πραγματικό χρόνο ανεφοδιασμού, ο αλγόριθμος για δέκα μέρες εμφανίζει καλύτερα αποτελέσματα καθώς τα χρήματα εξαντλούνται αργότερα αναλογικά με τις πέντε μέρες. Επίσης βλέπουμε πως για διπλάσιο χρόνο προσομοίωσης και προϋπολογισμό μειώνεται η πιθανότητα να εξαντληθεί το μηχάνημα από ρέστα, γεγονός που αποτελεί ένδειξη ότι συμφέρει να γίνεται ο ανεφοδιασμός μετά από μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Για να ελέγξουμε αν η διαφορά των δύο πιθανοτήτων είναι στατιστικά σημαντική σε ορισμένο επίπεδο σημαντικότητας χρησιμοποιήσαμε τον στατιστικό έλεγχο ισότητας μέσων τιμών (υπενθυμίζεται ότι κάθε πιθανότητα εκτιμάται από τη μέση τιμή ενός δείγματος 10 τιμών). Η σύγκριση φαίνεται στον Πίνακα 7 από όπου συμπεραίνουμε ότι η διαφορά μεταξύ των πιθανοτήτων είναι στατιστικά σημαντική ( $t > t_{0.025,18}$ ).

	Σενάριο 1 <sup>ο</sup>	
	Δείγμα 1 <sup>ο</sup>	Δείγμα 2 <sup>ο</sup>
<b>Χρόνος</b>	7200	14400
<b>Αρχικός Προϋπολογισμός</b>	8490	16980
$\bar{X}$	0.3320	0.27
$S$	0.0489	0.0356
$S_p$	0.0428	
$T$	4.58	
$t_{0.025,18}$	2.101	

Πίνακας 7: Σύγκριση μέσων τιμών

Στα σενάρια που αντιστοιχούν στον Πίνακα 9, όπου έχει αυξηθεί ο προϋπάρχων προϋπολογισμός αναλογικά τόσο για τις πέντε όσο και για τις δέκα μέρες, είναι εμφανές πως η πιθανότητα να ξεμείνει το μηχάνημα από ρέστα είναι μηδενική και πως οι ελάχιστες ποσότητες που απομένουν στο μηχάνημα είναι αρκετά υψηλές και διατηρούνται οι αναλογίες ανάμεσα στις πέντε και στις δέκα μέρες.

Επειδή οι κατανομές που επιλέξαμε δεν ταιριάζουν απόλυτα στα δεδομένα επαναλάβαμε την προσομοίωση για ντετερμινιστικούς χρόνους αφίξεων και παραμονής για να διαπιστώσουμε αν υπάρχει επίδραση στα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα για τα σενάρια των Πινάκων 8,9 δίνονται στους Πίνακες 10,11 αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση των ντετερμινιστικών χρόνων τα χρήματα εξαντλούνται πιο γρήγορα σε σχέση με τους στοχαστικούς χρόνους. Στον Πίνακα 10 παρατηρούμε πως τα χρήματα στο μηχάνημα εξαντλούνται και στις 1000 επαναλήψεις της προσομοίωσης, ενώ οι αντίστοιχες πιθανότητες στον Πίνακα 8 είναι 0.332 και 0.27.

Στον Πίνακα 11 διαπιστώνουμε πως τα χρήματα επαρκούν για την εξυπηρέτηση όλων των πελατών όπως συμβαίνει και στα αντίστοιχα σενάρια του Πίνακα 9. Παρατηρούνται όμως διαφορές στα εναπομείναντα ποσά της τάξης των 100€ για τις ελάχιστες τιμές και των 500€ και 1000€ κατά μέσο όρο. Συμπερασματικά, η κατανομή των χρόνων αφίξεων και παραμονής των πελατών στο σύστημα επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης..

		5 μέρες	10 μέρες
Χρόνος(min)		7200	14400
Αρχικός προϋπολογισμός		8490	16980
Αριθμός επαναλήψεων		1000	1000
Αριθμός αφιχθέντων πελατών		1120	2251
Πιθανότητα να εξαντληθεί το μηχάνημα από ρέστα (P)	Min	0.29	0.22
	Max	0.40	0.34
	Mean	0.3320	0.27
	Διάστημα εμπιστοσύνης	0.3064	0.2428
		0.3576	0.2972
Χρονική στιγμή που εξαντλείται το μηχάνημα από ρέστα (Q)	Min	6141	13308
	Max	7140.5	14335
	Mean	6314	13519
	Διάστημα εμπιστοσύνης	6245.9	13451
		6382	13587
Ποσό που απομένει στο μηχάνημα(E)	Min	0.10	3.70
	Max	1403	2445.5
	Mean	412.30	636.6
Ελάχιστες ποσότητες που απομένουν (min_V)	20 €	0	0
	10 €	0	0
	5 €	0	0
	2 €	0	0
	1 €	0	0
	0.5 €	0	0
	0.1 €	1	37
Μέγιστες ποσότητες που απομένουν (max_V)	20 €	0	0
	10 €	2	0
	5 €	0	0
	2 €	356	581
	1 €	556	1075
	0.5 €	334	630
	0.1 €	150	300
Μέσες τιμές των ποσοτήτων που απομένουν (mean_V)	20 €	0	0
	10 €	0	0
	5 €	0	0
	2 €	18	10
	1 €	235	349
	0.5 €	252	477
	0.1 €	149	298
Χρονική στιγμή που πρέπει ανεφοδιάζεται το μηχάνημα (W)		6917.4	14189

Πίνακας 8: Στοχαστικοί χρόνοι άφιξης και παραμονής

		5 μέρες	10 μέρες
Χρόνος (min)		7200	14400
Αρχικός προϋπολογισμός		11320	22640
Αριθμός επαναλήψεων		1000	1000
Αριθμός αφιχθέντων πελατών		1176	2251
Πιθανότητα να ξεμείνει το μηχάνημα από ρέστα (P)	Min	0	0
	Max	0	0
	Mean	0	0
	Διάστημα εμπιστοσύνης	0	0
		0	0
Χρονική στιγμή που ξεμείνει το μηχάνημα από ρέστα (Q)	Min	-	-
	Max	-	-
	Mean	-	-
	Διάστημα εμπιστοσύνης	-	-
		-	-
Ποσό που απομένει στο μηχάνημα(E)	Min	1548	3539.5
	Max	4283.5	8000.5
	Mean	3052	6051
Ελάχιστες ποσότητες που απομένουν (min_V)	20 €	0	0
	10 €	0	0
	5 €	0	0
	2 €	259	725
	1 €	769	1566
	0.5 €	447	935
	0.1 €	200	400
Μέγιστες ποσότητες που απομένουν (max_V)	20 €	25	40
	10 €	66	121
	5 €	65	88
	2 €	987	1889
	1 €	904	1776
	0.5 €	598	1133
	0.1 €	200	400
Μέσες τιμές των ποσοτήτων που απομένουν (mean_V)	20 €	2	2
	10 €	17	31
	5 €	10	15
	2 €	833	1694
	1 €	840	1682
	0.5 €	523	1044
	0.1 €	200	400
Χρονική στιγμή που πρέπει ανεφοδιάζεται το μηχάνημα (W)		-	-

Πίνακας 9: Στοχαστικοί χρόνοι άφιξης και παραμονής

		5 μέρες	10 μέρες
Χρόνος(min)		7200	14400
Αρχικός προϋπολογισμός		8490	16980
Αριθμός επαναλήψεων		1000	1000
Αριθμός αφιχθέντων πελατών		1110	2202
Πιθανότητα να εξαντληθεί το μηχάνημα από ρέστα (P)	Min	1	1
	Max	1	1
	Mean	1	1
	Διάστημα εμπιστοσύνης	1	1
		1	1
Χρονική στιγμή που εξαντλείται το μηχάνημα από ρέστα (Q)	Min	6143.3	13213
	Max	6183.4	13359
	Mean	6154.4	13298
	Διάστημα εμπιστοσύνης	6152.5	13294
		6156.2	13302
Ποσό που απομένει στο μηχάνημα(E)	Min	-	-
	Max	-	-
	Mean	-	-
Ελάχιστες ποσότητες που απομένουν (min_V)	20 €	-	-
	10 €	-	-
	5 €	-	-
	2 €	-	-
	1 €	-	-
	0.5 €	-	-
	0.1 €	-	-
Μέγιστες ποσότητες που απομένουν (max_V)	20 €	-	-
	10 €	-	-
	5 €	-	-
	2 €	-	-
	1 €	-	-
	0.5 €	-	-
	0.1 €	-	-
Μέσες τιμές των ποσοτήτων που απομένουν (mean_V)	20 €	-	-
	10 €	-	-
	5 €	-	-
	2 €	-	-
	1 €	-	-
	0.5 €	-	-
	0.1 €	-	-
Χρονική στιγμή που πρέπει ανεφοδιάζεται το μηχάνημα (W)		6154.4	13298

Πίνακας 10: Ντετερμινιστικοί χρόνοι άφιξης και παραμονής

		5 μέρες	10 μέρες
Χρόνος(min)		7200	14400
Αρχικός προϋπολογισμός		11320	12640
Αριθμός επαναλήψεων		1000	1000
Αριθμός αφιχθέντων πελατών		1110	2220
Πιθανότητα να εξαντληθεί το μηχάνημα από ρέστα (P)	Min	0	0
	Max	0	0
	Mean	0	0
	Διάστημα εμπιστοσύνης	0	0
		0	0
Χρονική στιγμή που εξαντλείται το μηχάνημα από ρέστα (Q)	Min	-	-
	Max	-	-
	Mean	-	-
	Διάστημα εμπιστοσύνης	-	-
		-	-
Ποσό που απομένει στο μηχάνημα(E)	Min	1408.5	3486.5
	Max	3618.5	6549.5
	Mean	2540.9	5048.5
Ελάχιστες ποσότητες που απομένουν (min_V)	20 €	0	0
	10 €	8	46
	5 €	0	0
	2 €	116	312
	1 €	883	1795
	0.5 €	110	252
	0.1 €	200	400
Μέγιστες ποσότητες που απομένουν (max_V)	20 €	37	60
	10 €	115	210
	5 €	0	0
	2 €	442	712
	1 €	988	1937
	0.5 €	196	365
	0.1 €	200	400
Μέσες τιμές των ποσοτήτων που απομένουν (mean_V)	20 €	9	15
	10 €	80	161
	5 €	0	0
	2 €	262	528
	1 €	937	1873
	0.5 €	152	303
	0.1 €	200	400
Χρονική στιγμή που πρέπει ανεφοδιάζεται το μηχάνημα (W)		-	-

Πίνακας 11:Ντετερμινιστικοί χρόνοι άφιξης και παραμονής



## Κεφάλαιο 5 Σύνοψη

Σε αυτήν την εργασία μελετήσαμε εκτενώς την προσομοίωση διαχείρισης ανεφοδιασμού μηχανημάτων αυτόματων συναλλαγών με εφαρμογή σε χώρους στάθμευσης. Επεξεργαστήκαμε τα δεδομένα που μας δόθηκαν από την εταιρία Cityzen με διάφορους στατιστικούς ελέγχους ώστε να προκύψουν οι κατανομές των χρόνων αφίξεων και παραμονής των πελατών στο σύστημα. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τους ελέγχους διαμορφώσαμε τον κώδικα προσομοίωσης στο υπολογιστικό πακέτο Matlab. Υλοποιήθηκαν διάφορα σενάρια με διακυμάνσεις στον προϋπολογισμό και στο χρόνο προσομοίωσης που οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι η πιθανότητα να εξαντληθούν τα χρήματα πριν την προγραμματισμένη αναπλήρωση μειώνεται όσο αυξάνεται το αρχικό ποσόν και ο χρόνος αναπλήρωσης. Επίσης καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης είναι άμεσα εξαρτώμενα από την εκάστοτε κατανομή των χρόνων αφίξεων και παραμονής των πελατών στο συγκεκριμένο χώρο στάθμευσης.

Τέλος, ένα θέμα που θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο περαιτέρω έρευνας είναι η επέκταση του μοντέλου για την περίπτωση που τα χρήματα που μπαίνουν στα μηχανήματα αυτομάτων συναλλαγών να μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως ρέστα.

## Βιβλιογραφία

- A. Biran, & M. Breiner. (2012). *MATLAB 6 για μηχανικούς* (3η εκδ.). (N.I. Μάργαρης, Επιμ., Δ. Πεταλάς, & Α. Δημητριάδης, Μεταφρ.) Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.
- B. Khoshnevis. (1999). *Προσομοίωση Διακριτών Συστημάτων*. (Α. Σωτηροπούλου, Μεταφρ.) Αθήνα: Εκδόσεις ΔΙΑΥΛΟΣ.
- J. Banks, B.L. Nelson, J.S. Carson, & D.M. Nicol. (2001). *Discrete-Event System Simulation* (3rd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- S.M. Ross. (1989). *Introduction to Probability Models* (4th ed.). Sixth Avenue, San Diego: Academic Press, INC.
- Δ.Π. Ψωινού. (1999). *Στατιστική*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΖΗΤΗ.

## Παράρτημα

### 1 Αλγόριθμος προγραμματισμού γεγονότων

Οτιδήποτε συμβαίνει κατά τη διάρκεια μίας εκτέλεσης και μπορεί να επηρεάσει την κατάσταση του συστήματος, καλείται γεγονός (event). Παράδειγμα τυπικών γεγονότων στην προσομοίωση ενός συστήματος ουρών είναι η άφιξη ενός πελάτη στο σύστημα, καθώς και η έναρξη ή ο τερματισμός της εξυπηρέτησης ενός πελάτη. Τέτοιου είδους γεγονότα επηρεάζουν το σύστημα, καθώς μπορούν να αλλάξουν τον αριθμό των πελατών που περιμένουν στην ουρά και στο σύστημα γενικότερα, ενώ αλλάζουν επιπλέον και την κατάσταση κάποιων πόρων, όπως οι εξυπηρετητές, οι οποίοι από απασχολημένοι (busy) μπορούν να μετατραπούν σε αδρανείς (idle) ή αντίστροφα.

Την περίπτωση που έχουμε σύστημα διακριτών γεγονότων, ο χρόνος της προσομοίωσης προωθείται από γεγονός σε γεγονός και κάθε φορά ενημερώνεται τόσο η κατάσταση του συστήματος, όσο και η νέα κατάσταση της λίστας των επόμενων γεγονότων. Στην αντίθετη περίπτωση, ο χρόνος προωθείται συνεχώς, γεγονός που κάνει τους υπολογισμούς πολύ πιο δύσκολους. Σε σύστημα διακριτού γεγονότος, που είναι και αυτό που μας ενδιαφέρει σε κάποια συγκεκριμένη στιγμή  $t$ , η λίστα περιέχει όλα τα γεγονότα τα οποία ήδη έχουν προγραμματιστεί για τις χρονικές στιγμές της πραγματοποίησής τους. Η λίστα είναι ταξινομημένη σύμφωνα με τις χρονικές αυτές στιγμές όπως φαίνεται στη συνέχεια.

$$t < t_1 \leq t_2 \leq t_3 \leq t_4 \leq t_5 \leq \dots \leq t_n$$

Η χρονική στιγμή  $t$  είναι η τιμή του ρολογιού της προσομοίωσης εκείνη τη στιγμή και το γεγονός με το χρόνο  $t_1$  είναι το επικείμενο γεγονός, το γεγονός που θα συμβεί στη συνέχεια. Ο χρόνος θα μεταφερθεί στο χρόνο  $t_1$ , το επικείμενο γεγονός θα αφαιρεθεί από τη λίστα και θα εκτελεστεί.

Η εκτέλεσή του θα δημιουργήσει μία νέα εικόνα του συστήματος και της λίστας, εικόνα που εξαρτάται από το ίδιο το γεγονός. Το γεγονός αυτό μπορεί να προκαλέσει τη δημιουργία νέων γεγονότων, τα οποία ανάλογα με το χρόνο εκτέλεσής τους θα πρέπει να μπουν στη σωστή θέση στην ανανεωμένη λίστα. Η διαδικασία αυτή εκτελείται μέχρι να τελειώσει η προσομοίωση. Η υλοποίηση της διαδικασίας επόμενου γεγονότος είναι ίσως η πιο δαπανηρή στα πλαίσια υπολογιστικών πόρων καθώς έχει να κάνει με μία λίστα η οποία αλλάζει συνεχώς κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Ο αποδοτικός τρόπος διαχείρισής του

προγραμματιστικά θα οδηγήσει σε αποδοτικό πρόγραμμα προσομοίωσης. Οι πιο σημαντικές ενέργειες αφορούν ενέργειες σε λίστα, τη λίστα επόμενου γεγονότος, και είναι οι ακόλουθες:

α. η προσθήκη γεγονότος στη σωστή θέση στη λίστα

β. η αφαίρεση του επικείμενου γεγονότος από τη λίστα

γ. μετά την αφαίρεση, εύρεση του επόμενου γεγονότος από τα εναπομείναντα στη λίστα

δ. η εύρεση κάποιου γεγονότος με συγκεκριμένες ιδιότητες και αφαίρεση – ακύρωσή του από τη λίστα

Η ενέργεια α αντιστοιχεί σε χρονικό προγραμματισμό ενός γεγονότος προς εκτέλεση, η β σε επιλογή του επόμενου γεγονότος για εκτέλεση, η γ σε εξακρίβωση του επόμενου γεγονότος για εκτέλεση και η ενέργεια δ στην ακύρωση ενός προγραμματισμένου γεγονότος. Η τελευταία αυτή ενέργεια δεν συμβαίνει πολύ συχνά και συνακόλουθα δεν επηρεάζει την συνολική απόδοση του αλγορίθμου. Επίσης η ενέργεια β συμβαίνει πάντα μαζί με την ενέργεια γ και μπορεί να θεωρηθεί σαν μια ενέργεια. Ο τρόπος με τον οποίο θα γίνουν αυτές και γενικότερα ο τρόπος με τον οποίο είναι οργανωμένη η λίστα, επηρεάζει πολύ την αποδοτικότητα του όλου μοντέλου.

## 2 Στατιστικοί έλεγχοι

Ο στατιστικός έλεγχος υποθέσεων είναι μια συμπερασματική διαδικασία/μέθοδος που προσφέρει η Στατιστική Συμπερασματολογία και βρίσκει εφαρμογή σε στοχαστικά προβλήματα απόφασης μεταξύ εναλλακτικών υποθέσεων. Στην εργασία μας χρησιμοποιήσαμε έλεγχο ισότητας μέσων τιμών καθώς και ελέγχους καλής προσαρμογής σε δεδομένα. Ο αρχαιότερος και γνωστότερος τέτοιος έλεγχος καλής προσαρμογής είναι ο έλεγχος Chi Square ( $\chi^2$ ) ο οποίος προτάθηκε από τον Pearson το 1900. Αργότερα, ο Kolmogorov (1933, 1941) επινόησε έναν εναλλακτικό έλεγχο για τον ίδιο σκοπό και ο Smirnov (1939, 1948) τον επέκτεινε για την περίπτωση του ελέγχου της υπόθεσης ότι δύο ανεξάρτητα δείγματα μπορούν να υποτεθούν ότι προέρχονται από την ίδια κατανομή.

## 2.1 Kolmogorov-Smirnov

Ο στατιστικός έλεγχος Kolmogorov-Smirnov (δοκιμή K-S ή δοκιμή KS) είναι μια μη παραμετρική δοκιμασία που χρησιμοποιείται για να συγκρίνει ένα δείγμα με μια κατανομή πιθανότητας αναφοράς ή να συγκρίνει δύο δείγματα μεταξύ τους. Ο έλεγχος αυτός ποσοτικοποιεί μια απόσταση μεταξύ μιας εμπειρικής συνάρτησης κατανομής του δείγματος και της αθροιστικής συνάρτησης της κατανομής αναφοράς, ή μεταξύ των εμπειρικών συναρτήσεων κατανομής των δύο δειγμάτων.

Γενικότερα, η δοκιμασία Kolmogorov-Smirnov μπορεί να τροποποιηθεί για να χρησιμεύσει ως ένα τεστ καλής προσαρμογής. Στην ειδική περίπτωση των δοκιμών για κανονικότητα της κατανομής, τα δείγματα είναι τυποποιημένα σύμφωνα με ένα πρότυπο κανονικής κατανομής. Αυτό είναι ισοδύναμο με τη ρύθμιση της μέσης τιμής και της διακύμανσης της κατανομής αναφοράς ώστε να ισοδυναμεί με τις εκτιμήσεις του δείγματος.

Ο έλεγχος Kolmogorov-Smirnov χρησιμοποιείται για να ληφθεί μια απόφαση αν ένα δείγμα ενός πληθυσμού ακολουθεί μια συγκεκριμένη στατιστική κατανομή ή όχι. Ορίζεται από τις παρακάτω υποθέσεις:

- $H_0$ : Τα δεδομένα ακολουθούν μια καθορισμένη κατανομή αναφοράς
- $H_1$ : Τα δεδομένα δεν ακολουθούν μια καθορισμένη κατανομή αναφοράς

Ο έλεγχος είναι βασισμένος σε μια συνάρτηση εμπειρικής κατανομής (ECDF, Empirical cumulative distribution function). Δεδομένου ότι  $N$  είναι το πλήθος των δεδομένων και  $Y_i$  είναι οι τιμές του δείγματος που μελετάμε, η συνάρτηση ECPF ορίζεται ως εξής:

$$E_N(Y_i) = \frac{n(i)}{N}$$

όπου  $n(i)$  είναι ο αριθμός των δεδομένων ο οποίος είναι μικρότερος από  $Y_i$ . Τα  $Y_i$  ταξινομούνται από τη μικρότερη στη μεγαλύτερη τιμή και υπολογίζεται η παρακάτω ποσότητα

$$D = \max_{1 \leq i \leq N} \left| F(Y_i) - \frac{i}{N} \right|$$

όπου  $F$  είναι η αθροιστική κατανομή αναφοράς. Όσον αφορά το  $D$  ελέγχουμε από πίνακες αν ξεπερνάει την κρίσιμη τιμή ή όχι. Στην περίπτωση που την ξεπερνάει απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση και καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η κατανομή αναφοράς δεν προσαρμόζεται στα δεδομένα.

## 2.2 Chi-Squared

Το εύρος των τιμών που μπορεί να πάρει μια τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την κατανομή αναφοράς χωρίζεται σε  $n$  διαστήματα. Ο έλεγχος  $X^2$  βασίζεται στη διαφορά μεταξύ του πλήθους των τιμών του δείγματος και του προσδοκώμενου πλήθους των τιμών αυτών σύμφωνα με την κατανομή αναφοράς. Συγκεκριμένα υπολογίζεται το

$$X^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

όπου  $O_i$  = πλήθος τιμών δείγματος στο διάστημα  $i$

$E_i = Np_i$  = προσδοκώμενο πλήθος τιμών δείγματος στο διάστημα  $i$

$N$  = μέγεθος δείγματος

$p_i$  = πιθανότητα διαστήματος  $i$  σύμφωνα με την κατανομή αναφοράς

Η τιμή  $X^2$  συγκρίνεται με την κρίσιμη τιμή  $X_{a,n-1-\lambda}^2$  (από πίνακες της κατανομής  $X^2$ ) όπου  $\lambda$  ο αριθμός των παραμέτρων της κατανομής αναφοράς που χρειάζεται να εκτιμηθούν. Αν  $X^2 > X_{a,n-1-\lambda}^2$ , η υπόθεση ότι η κατανομή αναφοράς προσαρμόζεται στα δεδομένα απορρίπτεται.

## 2.3 Σύγκριση μέσων τιμών

Με βάση τον στατιστικό έλεγχο ισότητας μέσων τιμών θα ελέγξουμε κατά πόσο οι μέσες τιμές μπορούν να θεωρηθούν ότι δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σε ορισμένο επίπεδο σημαντικότητας. Η σύγκριση των μέσων τιμών  $\mu_1, \mu_2$  δύο πληθυσμών γίνεται μέσω ελέγχων υποθέσεων της ακόλουθης μορφής:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

Η υπόθεση  $H_0$  απορρίπτεται χάριν της  $H_1$  όταν ισχύουν τα εξής:

$$|\bar{X}_1 - \bar{X}_2| > t_{\frac{\alpha}{2}, n_1+n_2-2} S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}$$

- $\bar{X}_1, \bar{X}_2$ : μέσες τιμές δειγμάτων
- $S_p = \sqrt{\frac{(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$ : συνολική τυπική απόκλιση
- $S_1, S_2$ : τυπική απόκλιση του κάθε δείγματος
- $n_1, n_2$ : μέγεθος του κάθε δείγματος
- $\alpha$ : επίπεδο σημαντικότητας

### 3 Υπολογιστικά πακέτα που χρησιμοποιήθηκαν

#### 3.1 Matlab

Το Matlab είναι ένα λογισμικό πακέτο για υψηλής απόδοσης αριθμητικούς υπολογισμούς. Παρέχει στο χρήστη ένα διαδραστικό περιβάλλον με χιλιάδες ενσωματωμένες συναρτήσεις, κατάλληλες για την υλοποίηση απαιτητικών υπολογιστικών αναλύσεων, γραφημάτων καθώς επίσης και για την παραγωγή διαφόρων animations. Επιπλέον, το Matlab προσφέρει τη δυνατότητα επέκτασης σε ποικίλα πεδία εφαρμογών με τη αξιοποίηση την υψηλού επιπέδου γλώσσας προγραμματισμού, την οποία διαθέτει σε όλες τις εκδόσεις του.

Το Matlab αποτελεί ένα εξελεγμένο υπολογιστικό εργαλείο, το οποίο μπορεί να βρει εφαρμογή σε διάφορους τομείς της επιστήμης αλλά βέβαια και της πράξης, όπως για παράδειγμα τη μηχανική, την ιατρική, τις θετικές επιστήμες (Μαθηματικά– Φυσική), την οικονομία καθώς και γενικά τη βιομηχανική παραγωγή. Μάλιστα, το φάσμα των εφαρμογών του συγκεκριμένου πακέτου λογισμικού διευρύνεται συνεχώς και περισσότερο, αναδεικνύοντας με αυτό τον τρόπο τις πολλαπλές δυνατότητες του, όπως:

- Υψηλή απόδοση και ταχύτητα υπολογιστικών αναλύσεων.
- Δυνατότητα προσομοίωσης φυσικών συστημάτων.
- Δυνατότητα υλοποίησης αλγορίθμων.
- Υψηλής ποιότητας γραφικές απεικονίσεις και animations.
- Φιλικότητα προς το χρήστη και διαδραστικός χαρακτήρας.

Οι ενσωματωμένες συναρτήσεις του λογισμικού παρέχουν τα απαραίτητα πακέτα εργαλείων για υπολογισμούς γραμμικής άλγεβρας, ανάλυσης δεδομένων,

επεξεργασίας σημάτων, αριθμητικές λύσεις κανονικών διαφορικών εξισώσεων. Οι περισσότερες από τις προαναφερόμενες συναρτήσεις εφαρμόζουν την πλέον πρόσφατη και εξελιγμένη γνώση στο κάθε τομέα επιστήμης. Επίσης ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αναπτύξει τις δικές του συναρτήσεις, κάνοντας χρήση της δικής του γλώσσας προγραμματισμού. Από τη στιγμή που θα αναπτυχθούν οι συναρτήσεις αυτές, λειτουργούν ως ενσωματωμένες συναρτήσεις του εν λόγω λογισμικού. Επίσης παρέχονται από το Matlab πολλές προαιρετικές εργαλειαθήκες, οι οποίες προορίζονται για την ανάπτυξη ειδικών εφαρμογών.

### 3.2 S.P.S.S.

Το S.P.S.S. (Statistical Package for Social Sciences) είναι ένα στατιστικό πακέτο που έχει πολλές δυνατότητες όσον αφορά την επεξεργασία και παρουσίαση των δεδομένων μιας επιστημονικής έρευνας αλλά και μεγάλη αξιοπιστία.

Όσον αφορά το στατιστικό πακέτο S.P.S.S.(Statistical Package for Social Sciences) προσφέρει αρκετές δυνατότητες χρήσης πινάκων στο χρήστη όχι όμως με επιλογές menu αλλά από το Command Syntax, δηλαδή ο χρήστης πρέπει να φτιάξει μικρά προγράμματα για να κάνει τις πράξεις που επιθυμεί. Στην πραγματικότητα οι δυνατότητες είναι πολύ μεγαλύτερες καθώς πολλές συναρτήσεις που προσφέρονται μπορούν να συνδυαστούν για να καλύψουν με μια εντολή σειρά πράξεων μεταξύ πινάκων. Έτσι τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρήση πινάκων στο SPSS είναι οι εξής:

- Εκτέλεση μιας σειράς πράξεων με μια μόνο εντολή
- Παρέχονται πολλές συναρτήσεις γραμμικής άλγεβρας για συγκεκριμένες διαδικασίες με πίνακες
- Οι πίνακες που προκύπτουν μπορούν να αποθηκευτούν για να χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια από άλλες στατιστικές αναλύσεις

Οι τελευταίες εκδόσεις του S.P.S.S. έχουν γραφικό περιβάλλον, πράγμα που το καθιστά πολύ εύκολο για την χειριστή του.

### 3.3 Arena

Το Arena είναι ένα λογισμικό προσομοίωσης της εταιρείας Rockwell Automation. Στο Arena ο χρήστης κατασκευάζει το μοντέλο προσομοίωσης που επιθυμεί, εισάγοντας τα modules («κουτιά» διαφορετικών σχημάτων), τα οποία



αναπαριστούν διαφορετικές διαδικασίες και έχουν αντίστοιχα διάφορες ιδιότητες. Τα modules μπορούν να ενωθούν με συνδετικές γραμμές αναπαριστώντας το σύστημα για προσομοίωση. Επιπρόσθετα, το Arena χρησιμοποιεί τεχνολογίες της Microsoft. Στην περίπτωση που θα χρειαστεί να χρησιμοποιηθεί κώδικας για το μοντέλο που σχηματίζεται, το Arena υποστηρίζει την γλώσσα Visual Basic for Applications, ώστε να επιτευχθεί περισσότερη αυτοματοποίηση και ευκολία. Υποστηρίζεται επίσης η χρήση διαγραμμάτων ροής του Microsoft Visio, καθώς και η ανάγνωση από και εγγραφή σε φύλλα Excel και βάσεις δεδομένων σε Access. Άλλωστε, το λογισμικό Arena εξάγει και στατιστικά στοιχεία σε μορφή αναφορών, κάτι που θα μας φανεί ιδιαίτερα χρήσιμο στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του λογισμικού Arena.

- Λογική και σταθερή μεθοδολογία μοντελοποίησης.
- Υποστηρίζει διαγράμματα ροής.
- Δυνατότητα επέκτασης και επαναχρησιμοποίησης του κώδικα. Ο χρήστης μπορεί να λάβει τμήματα κώδικα από άλλους χρήστες ή να δώσει ένα δικό του τμήμα κώδικα σε άλλους χρήστες και να τα εισάγει στο μοντέλο.
- Εύχρηστο και φιλικό προς τον χρήστη ακόμα και αν είναι αρχάριος. Είναι ταυτόχρονα ικανοποιητικό και για έναν έμπειρο χρήστη.
- Δυνατότητες αναφορών και παρουσίασης. Εμπεριέχει πλήθος αναφορών και παρουσίασης, στατιστικών στοιχείων και ανάλυσης δεδομένων εισόδου εξόδου ακόμα και με animation.

## 4 Κώδικας Προσομίωσης

```
% Copyright(C) Grigoriadou_Eleni & Sioziou_Vasiliki 2016
% Simulation_code_main_progran
% Monetary_supply_for_automatic_teller_machines
% Exponential_arrival_rate & Weibull_departure_rate

%u:number of replication blocks
%r:number of replications in each block
%t:time of an arrival or departure event
%k:number of non succeeded transactions
%T:total simulation time
%Q:time of non remaining money in the machine
%P(u):probability of non remaining money in the machine
%V:remaining amount of money in the machine(for all replications)
%E:remaining amount of each coin and bill in the machine
% (for all replications)
%W:appropriate time of supply
%SA:number of customers
%payment:variable with two options,payment=1 transaction is succeeded
%                               payment=2 transaction is not
succeeded
%FEL:future event list
%budget:amount of each coin and bill which remain in the machine
% (different for each replication)
%total_budget:amount of money which remains in the machine
% (different for each replication)
%charge:depended on the difference between arrival and departure time
%money:amount of inserted money
%change:total amount of money which should be given
%bucks:amount of each coin and bill which should be given to each
% costumer(different for each replication)

V=[];
E=[];

for u=1:10
    T=14400; %total simulation
    r=100; %number of replications
    payment=0;
    k=0;
    Q=[];
    X=[];
    Y=[];
    SA=0;
    for i=1:r
        i
        budget=8*[0 30 50 100 400 300 250 0 50];
        total_budget=budget*[50 20 10 5 2 1 0.5 0.2 0.1]';
        t=-log(rand(1))*10.21; %time of first arrival
```

```

        FEL=[t 1 1];

while t<T
t;
if FEL(1,2)==1
            SA=SA+1;
            t1=mod(t,1440);

if t1<=120
x1=-log(rand(1))*10.21;
if t1+x1<=120
                                FEL=[FEL;t+x1 1 1];

else
x2=(t1+x1-120)*0.744/10.21;
x3=t+120-t1+x2;
                                FEL=[FEL;x3 1 1];

end
elseif t1>120 && t1<= 240
x1=-log(rand(1))*0.744;
if t1+x1<=240
                                FEL=[FEL;t+x1 1 1];

else
x2=(t1+x1-240)*2.934/0.744;
x3=t+240-t1+x2;
                                FEL=[FEL;x3 1 1];

end
elseif t1>240 && t1<= 360
x1=-log(rand(1))*2.934;
if t1+x1<=360
                                FEL=[FEL;t+x1 1 1];

else
x2=(t1+x1-360)*98.63/2.934;
x3=t+360-t1+x2;
                                FEL=[FEL;x3 1 1];

end
else
x1=-log(rand(1))*98.63;
if t1+x1<=1440
                                FEL=[FEL;t+x1 1 1];

else
x2=(t1+x1-1440)*10.21/98.63;
x3=t+1440-t1+x2;
                                FEL=[FEL;x3 1 1];

end
end

if mod(t,1440)<=120
                                m=wblrnd(263,2.12);
elseif 120 < mod(t,1440) && mod(t,1440)<= 240
                                m=wblrnd(217,1.91);
elseif 240 < mod(t,1440) && mod(t,1440)<= 360
                                m=wblrnd(148,1.63);
else
                                m=wblrnd(95.5,0.931);
end

                                FEL=[FEL;t+m 2 m];

else
                                z=FEL(1,3);

```

```

charge=charge_function(z);
[f2,change]=money_function(charge);
if change>0
    [bucks,payment]=
change_function(change,total_budget,budget);
if payment==2
if budget(1,:)>= bucks(1,:)
budget=budget-bucks;
total_budget= budget*[50 20
10 5 2 1 0.5 0.2 0.1]';
end
else
disp('stop');
k=k+1;
Q(k)=t;
break
end
end

end
FEL(1,(:,:))=[];
FEL=sortrows(FEL); %arrange events in
%increasing time of occurrence
t=FEL(1,1); %time of next event

end
if payment==2
X(i,:)=budget;
Y(i)=total_budget;
end
k;
end

P(u)=k/r;
if k<r
X( all(X==0,2),:)=[];
Y(Y==0)=[];
V=[V;X];
E=[E Y];

end
end

%%calculations%%
P;
mean_p=mean(P)
min_p=min(P)
max_p=max(P)
SEM = std(P)/sqrt(length(P)); % Standard Error
ts = tinv([0.025 0.975],length(P)-1); % T-Score
CI= mean(P) + ts*SEM % Confidence Intervals
Q;
min_Q=min(Q)
max_Q=max(Q)
mean_Q=mean(Q)
SEMq = std(Q)/sqrt(length(Q)); % Standard Error
tq = tinv([0.025 0.975],length(Q)-1); % T-Score
CI_Q= mean(Q) + tq*SEMq % Confidence Intervals

```

```

E;
mean_e=mean(E)
min_e=min(E)
max_e=max(E)
V;
mean_v=mean(V)
min_v=min(V)
max_v=max(V)
W=mean_Q*mean_p+T*(1-mean_p)

% Copyright(C) Grigoriadou_Eleni & Sioziou_Vasiliki 2016
% Simulation_code_main_program
% Monetary_supply_for_automatic_teller_machines
% Steady_arrival_rate & Steady_weibull_departure_rate

V=[];
E=[];

for u=1:10
    T=14400; %total simulation
    r=100; %number of replications
    payment=0;
    k=0;
    Q=[];
    X=[];
    Y=[];
    SA=0;
    for i=1:r
        i
        budget=6.6*[0 30 50 100 400 300 250 0 50];
        total_budget=budget*[50 20 10 5 2 1 0.5 0.2 0.1]';
        t=10.21; %time of first arrival
        FEL=[t 1 1];

        while t<T
            t;
            if FEL(1,2)==1
                SA=SA+1;
                t1=mod(t,1440);

                if t1<=120
                    x1=10.21;
                    if t1+x1<=120
                        FEL=[FEL;t+x1 1 1];
                    else
                        x2=t+120-t1+0.744;
                        FEL=[FEL;x2 1 1];
                    end
                elseif t1>120 && t1<= 240
                    x1=0.744;
                    if t1+x1<=240
                        FEL=[FEL;t+x1 1 1];
                    else
                        x2=t+240-t1+2.934;
                        FEL=[FEL;x2 1 1];
                    end
                elseif t1>240 && t1<= 360

```

```

x1=2.934;
if t1+x1<=360
    FEL=[FEL;t+x1 1 1];
else
    x2=t+360-t1+98.63;
    FEL=[FEL;x2 1 1];
end
else
    x1=98.63;
    if t1+x1<=1440
        FEL=[FEL;t+x1 1 1];
    else
        x2=t+1440-t1+10.21;
        FEL=[FEL;x2 1 1];
    end
end

if mod(t,1440)<=120
    m=wblstat(263,2.12);
elseif 120 < mod(t,1440) && mod(t,1440) <= 240
    m=wblstat(217,1.91);
elseif 240 < mod(t,1440) && mod(t,1440) <= 360
    m=wblstat(148,1.63);
else
    m=wblstat(95.5,0.931);
end

FEL=[FEL;t+m 2 m];

else
    z=FEL(1,3);
charge=charge_function(z);
[f2,change]=money_function(charge);
if change>0
    [bucks,payment]=
change_function(charge,total_budget,budget);
if payment==2
    if budget(1,:)>= bucks(1,:)
        budget=budget-bucks;
        total_budget= budget*[50 20
10 5 2 1 0.5 0.2 0.1]';
    end
    else
        disp('stop')
        k=k+1;
    end
    Q(k)=t;
    break
end
end

FEL(1,,:)=[];
FEL=sortrows(FEL); %arrange events in
increasing time of occurrence
t=FEL(1,1); %time of next event

end
if payment==2
    X(i,:)=budget;

```

```

Y(i)=total_budget;
end
k;
end

P(u)=k/r;
if k<r
X( all (X==0,2),:)=[];
                                Y (Y==0)=[];
                                V=[V;X];
                                E=[E Y];
end
end

%%calculations%%
P;
mean_p=mean(P)
min_p=min(P)
max_p=max(P)
SEM = std(P)/sqrt(length(P));           % Standard Error
ts = tinv([0.025 0.975],length(P)-1);   % T-Score
CI= mean(P) + ts*SEM                    % Confidence Intervals
Q;
min_Q=min(Q)
max_Q=max(Q)
mean_Q=mean(Q)
SEMq = std(Q)/sqrt(length(Q)) ;          % Standard Error
tq = tinv([0.025 0.975],length(Q)-1);   % T-Score
CI_Q= mean(Q) + tq*SEMq                 % Confidence Intervals
E;
mean_e=mean(E)
min_e=min(E)
max_e=max(E)
V;
mean_v=mean(V)
min_v=min(V)
max_v=max(V)
W=mean_Q*mean_p+T*(1-mean_p)

```

## **%charge\_function**

```

function charge = charge_function( z )

if z<=60
    CH=8;
elseif z>60 && z<= 120
    CH= 9;
elseif z>120 && z<= 180
    CH= 10.5;
elseif z>180 && z<= 240
    CH= 12.5;
elseif z>240 && z<= 300
    CH= 13.5;
elseif z>300 && z<= 360
    CH= 15;
elseif z>360 && z<= 420

```

```

                CH= 16;
elseif z>420 && z<= 480
                CH= 17;
else
                CH=17;
end
charge=CH;
end

```

### **%money\_function**

```

function [ f2, change ] = money_function( charge )

    l=rand(1,1);

    if charge <= 10
    if l>0 && l<=0.67
    money=10;
    elseif l>0.67 && l<= 0.91
    money=20;
    elseif l>0.91 && l<= 0.98
    money=50;
    else
    money=charge;
    end

    elseif charge>10 && charge<=15
    if l>0 && l<= 0.14
    money=15;
    elseif l>0.14 && l<= 0.62
    money=20;
    elseif l>0.62 && l<= 0.72
    money=50;
    elseif l>0.72 && l<= 0.92
    money=charge;
    else
    money=ceil(charge); % rounds to the nearest integer
    end

    elseif charge>15 && charge<=20
    if l>0 && l<= 0.57
    money=20;
    elseif l>0.57 && l<= 0.71
    money=50;
    elseif l>0.71 && l<= 0.95
    money=charge;
    else
    money=ceil(charge);
    end

    end

    f2=money;
    change=f2-charge;

```



end

## **%change\_function**

```
function [bucks,payment,budget] = change_function( change,  
total_budget, budget )
```

```
bucks=[0 0 0 0 0 0 0 0 0];  
fifty = 0;  
twenty = 0;  
ten = 0;  
five = 0;  
two=0;  
one=0;  
fifty_cent=0;  
twenty_cent=0;  
ten_cent=0;  
  
while change>=0.10  
if total_budget>change  
payment=2;  
if change >= 49.99 && budget(1,1)>0  
change = change - 50;  
budget(1,1)=budget(1,1)-1;  
fifty = fifty + 1;  
elseif change >= 19.99 && budget(1,2)>0  
change = change - 20;  
budget(1,2)=budget(1,2)-1;  
twenty = twenty + 1;  
elseif change >= 9.99 && budget(1,3)>0  
change = change - 10;  
budget(1,3)=budget(1,3)-1;  
ten = ten + 1;  
elseif change >= 4.99 && budget(1,4)>0  
change = change - 5;  
budget(1,4)=budget(1,4)-1;  
five = five +1;  
elseif change >= 1.99 && budget(1,5)>0  
change = change - 2;  
budget(1,5)=budget(1,5)-1;  
two = two + 1;  
elseif change >= 0.99 && budget(1,6)>0  
change = change - 1;  
budget(1,6)=budget(1,6)-1;  
one = one +1;  
elseif change >= 0.499 && budget(1,7)>0  
change = change - 0.50;  
budget(1,7)=budget(1,7)-1;  
fifty_cent = fifty_cent + 1;  
elseif change >= 0.199 && budget(1,8)>0  
change = change - 0.20;  
budget(1,8)=budget(1,8)-1;  
twenty_cent = twenty_cent + 1;  
elseif change >= 0.099 && budget(1,9)>0  
change = change - 0.10;  
budget(1,9)=budget(1,9)-1;
```

```

                                ten_cent = ten_cent +1;
else
    payment=1;
    disp('den yparxoun resta')
    change=0;
    bucks=[0 0 0 0 0 0 0 0 0];
end

else
    payment=1;
    disp('den yparxoun restaaaa')
    change=0;
    bucks=[0 0 0 0 0 0 0 0 0];
end
end
if payment==2
    bucks = [fifty twenty ten five two one fifty_cent twenty_cent
ten_cent];
end
end

```